



Ir. Th. G. Barbian*

Koeling van kantoorgebouwen met adiabatiscbe bevochtiging en verhoging van de luchtsnelheid

Cooling of the office buildings with adiabatic evaporation and increase of air velocity



Dr. ir. A.H.C. van Paassen*

Inleiding

Door de geavanceerdere apparatuur in kantoorruimten is in de loop van de jaren de interne belasting (W/m^2) voortdurend toegenomen. Hierdoor is ook de noodzaak om kantoorruimten te koelen gegroeid. Normaal gesproken wordt airconditioningsapparatuur gebruikt om te koelen. Er zijn twee andere mogelijkheden om te koelen onderzocht: enerzijds directe adiabatiscbe bevochtiging en anderzijds verhoging van de luchtsnelheid met bijvoorbeeld een tafel- of plafondventilator. Deze mogelijkheden kunnen alternatieven zijn voor lokale airconditioners, zoals "window units" en "split systems". Deze hebben een hoog energiegebruik en het gebruik van cfk's als koude-middel als nadeel. Een ander alternatief, indirecte adiabatiscbe bevochtiging, is buiten beschouwing gelaten. Bij dit onderzoek is er van uitgegaan, dat de luchttoe- en afvoer via de gevel plaats vindt, hetzij op natuurlijke wijze zoals bij het Passief Klimaat-systeem [1] of op mechanische wijze met een ventilator. De luchttoevoer geschiedt via een laag geplaatste opening en de afvoer via een bovenraam, zodat een effectieve afvoer van warmte mogelijk is. Twee vormen van bevochtiging zullen worden besproken: bevochtiging van de aangezogen buitenlucht via een gevelunit (uitgangspunt bij berekening) en bevochtiging van de vertrek lucht zelf door een apparaat in het vertrek. Een tweede uitgangspunt is dat een goede buitenzonwering is toegepast, waardoor de invloed van de zonnestraling beperkt kan blijven.

Als referentie is gekozen een met buitenlucht geventileerd vertrek met een goede zonwering en warmteaccumulerend vermogen. De onderzoeksvraag is: "Hoeveel interne belasting kan men extra toelaten, indien verdampingskoeling en/of een verhoogde luchtsnelheid worden toegepast".

Samenvatting

Er is onderzocht of op een andere manier dan met de gebruikelijke koelapparatuur kantoorgebouwen gekoeld kunnen worden. Eenvoudige en weinig energie gebruikende methoden zijn onderzocht, zoals de adiabatiscbe bevochtiger die via de gevel buitenlucht aanzuigt en deze enkele graden lager in temperatuur het vertrek inblaast. Zelfs de tafel- of plafond ventilator, waarvan veelvuldig gebruik wordt gemaakt om de te hoge temperaturen in de zomer te doorstaan, is aan een onderzoek onderworpen.

Beide methoden zijn met een computersimulatie geanalyseerd.

Summary

As a result of the drawbacks of the conventional cooling installations for the environment we undertook to investigate alternatives, such as the cooling effect of adiabatic evaporation and the increase of air velocity at increasing temperatures.

Adiabatiscbe bevochtiging

Indien adiabatiscb wordt bevochtigd blijft de enthalpie constant. Langs de isenthalp daalt de temperatuur en stijgt de absolute vochtigheid. Hierdoor ontstaat een koelend effect.

De mate van bevochtiging wordt gegeven door het bevochtigingsrendement η .

Hiervoor geldt dat:

$$\eta = \frac{x_C - x_A}{x_B - x_A}$$

En omdat de bevochtiging adiabatiscb is geldt ook bij benadering:

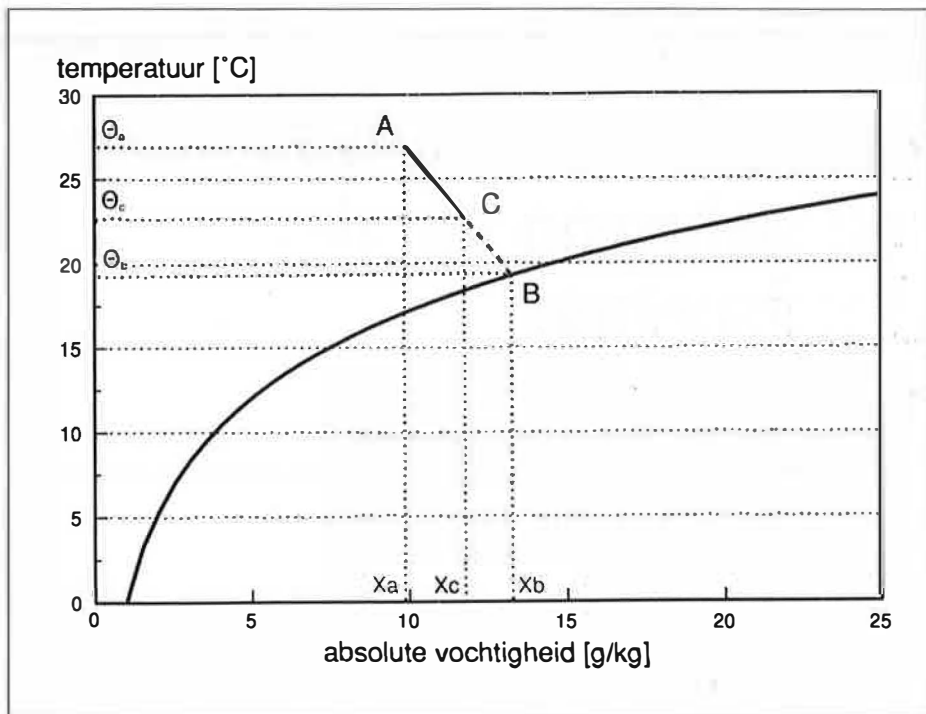
$$\eta = \frac{\theta_A - \theta_C}{\theta_A - \theta_B}$$

Dit is weergegeven in figuur 1. Hierbij is x : absolute vochtigheid (g/kg)
 θ : temperatuur ($^{\circ}C$)

Situatie A is voor en situatie C is na bevochtiging. Situatie B geeft de theoretisch maximaal bereikbare situatie na bevochtiging (tot de verzadigingslijn) wanneer vanuit A adiabatiscb wordt bevochtigd.

De bevochtiger wordt niet alleen gebruikt voor koeling in de zomer maar

* ir. Th. G. Barbian, afstudeerwerk.
Huidige werkkring Ingenieursbureau Linssen bv. te Amsterdam.
dr. ir. A.H.C. van Paassen,
Universitair Hoofddocent, Technische Universiteit Delft, Faculteit der Werktuigbouwkunde en Maritieme Techniek, Sectie Koudetechniek en Klimaatregeling.



Figuur 1. Luchtcondities voor het bepalen van het bevochtigingsrendement.

ook voor het bevochtigen van de droge ventilatielucht in de winter om zodoende het comfort in de ruimten te verhogen en statische elektriciteit te voorkomen. Als lucht van buiten bij constante absolute vochtigheid x (g/kg) wordt verwarmd tot kamertemperatuur kan hierdoor de relatieve vochtigheid tot 20 of 30% dalen waardoor de lucht te droog wordt. Door te bevochtigen kan gezorgd worden voor een minimaal benodigde relatieve vochtigheid van 40% [2]. Als deze bevochtiging adiabatisch gebeurt is wel extra verwarming nodig om de temperatuurdaling op te heffen. Er zijn verschillende manieren mogelijk om te bevochtigen. Stoombevochtiging kan niet voor koeling worden gebruikt omdat het niet adiabatisch is. Wel worden verstuivingsbevochtiging en koud verdampingsbevochtiging behandeld.

Verstuivingsbevochtiging

Hierbij worden kleine waterdruppeltjes de ruimte in geslingerd. Er zijn verschillende manieren waarop dit kan gebeuren.

De eerste manier is het schotelprincipe. Hierbij wordt het water door een roterende conisch gevormde cilinder opgezogen en via een schotel tegen de verstuiverkrans aan geslingerd. De waterdruppels worden uiteen getrokken tot een nevel die afgevoerd en opgenomen wordt door de droge lucht.

De tweede mogelijkheid is ultrasone trilling. Hierbij wordt een elektronisch opgewekte ultrasone trilling omgezet in

een mechanische trilling. Deze wordt via een membraan op het water overgebracht waardoor een nevel van fijne waterdruppeltjes ontstaat.

Als laatste wordt de persluchtbevochtiging genoemd. Door de kosten van een compressor en een persluchtleidingnet is dit pas rendabel als zeer veel bevochtiging nodig is zoals bij toepassingen in de tuinbouwkassen.

De waterdruppeltjes verdampen na een bepaalde tijd, afhankelijk van de druppeltjesgrootte, de temperatuur, de mate van inducie en de vochtigheid van de luchtstraal waarin de druppeltjes zich bevinden.

Als het te lang duurt voordat de druppeltjes verdampen (lange nevelstraal) is de kans groter dat druppeltjes in aanraking zijn gekomen met de muur of andere objecten in een ruimte. Bij een centrale luchtbehandelingsinstallatie hoeft dit overigens geen probleem te zijn. Wanneer het waterdruppeltje is verdampd zal de kalk die zich in elk druppeltje bevindt neerslaan. Deze kalkneerslag is een nadeel van alle verstuivingsbevochtigers. Dit probleem kan worden voorkomen door het water centraal te demineraliseren. Dit brengt wel extra kosten met zich mee.

Koud-verdampingskoeling

Bij koud-verdampingskoeling wordt, in tegenstelling tot de vorige principes, het vocht niet rechtstreeks in de ruimte gebracht. Een ventilator zuigt de bin-

nenlucht door een bevochtigingsmat en blaast de lucht daarna met een hogere vochtigheid weer de ruimte in. In de bevochtigingsmat, die of roteert of vast is, wordt de lucht bovendien gefilterd. De bevochtigde lucht, die druppelvrij is, wordt daarna de ruimte ingeblazen. Er is geen gevaar voor kalkneerslag, omdat alleen het water verdampt en de kalk uit het water in de mat achterblijft. Hierdoor wordt de mat wel vervuild. Regelmatige reiniging of vervanging van de mat is dan ook noodzakelijk. Als zich in de bevochtiger stilstaand water bevindt is de kans op vorming van bacteriën aanwezig. Door een watertoevoer en -afvoer te plaatsen kan deze kans worden verkleind. Ook andere oplossingen, zoals iedere nacht het water verhitten of het laten oplossen van ozon, zijn mogelijk. Het water kan of centraal, of in de bevochtiger zelf worden behandeld. Dit soort apparaten treft men veelvuldig aan in musea voor de regeling van de relatieve vochtigheid.

Voor- en nadelen verdampingskoeling

Er zijn enkele redenen om verdampingskoeling te gebruiken in plaats van verstuivingsbevochtiging. Bij verstuivingsbevochtiging is een nevelstraal zichtbaar in de ruimte. Het is niet ondenkbaar dat alleen al het zien van zo'n nevelstraal de aanwezige personen het gevoel geeft dat het te vochtig is terwijl dit niet het geval is. Dergelijke psychische barrières zijn moeilijk in te schatten. Verder is bij verdampingskoeling de bevochtigingscapaciteit afhankelijk van de temperatuur en de relatieve (en absolute) vochtigheid van de lucht. Bij lagere temperatuur en bij hogere relatieve vochtigheid neemt de bevochtigingscapaciteit af. Mits de bevochtiger goed gekozen is voor de ruimte kan hierdoor een soort zelfregelend systeem ontstaan.

In vergelijking tot de gebruikelijke airconditioningsapparatuur heeft verdampingskoeling een zeer laag energiegebruik en het ontbreken van een schadelijk koudemiddel als voordeel. Nadeel is het gevaar voor het ontstaan van bacteriën en de onderhoudsgevoeligheid van de luchtbevochtigers.

Een ander nadeel is dat de prijs van de luchtbevochtigers hoger ligt dan die van airconditioning units (airco's) met vergelijkbaar koelvermogen. De oorzaak hiervan is waarschijnlijk de geringe seriegrootte waarin luchtbevochtigers worden gefabriceerd. Omdat de luchtbevochtiger uit eenvoudiger onderdelen bestaat dan een airconditioner kunnen

luchtbevochtigers bij gelijke seriegrootte in principe voor een lagere prijs dan air-conditioners worden gefabriceerd.

Norm gebaseerd op de PMV-index

Voor de beoordeling van de luchtconditie in de ruimte is gebruik gemaakt van de norm van de Rijksgebouwendienst gebaseerd op de PMV-index. Deze houdt in dat gedurende 100 uren per jaar de PMV groter mag zijn dan +0,5 en dat 100 uren per jaar de PMV lager mag zijn dan -0,5. Alleen de overschrijding van +0,5 is bekeken [3,4,5]. De norm gebaseerd op de PMV-index heeft de voorkeur omdat hiermee de invloed van de vochtigheid van de lucht (en de luchtsnelheid) te bepalen is. Met de vergelijkingen van Fanger kan (helaas) echter niet worden bepaald of een bepaalde luchtconditie te vochtig of te droog is. Ook is geen norm bekend betreffende het aantal uren dat bepaalde grenzen van de vochtigheid mogen worden overschreden.

Verhoging van comfort door het verhogen van de luchtsnelheid.

Naast de adiabatische bevochtiging is ook gekeken naar de invloed van het verhogen van de luchtsnelheid. Uit tabellen kan worden afgeleid dat bij een metabolisme $M = 70 \text{ W/m}^2$ en warmte-weerstand van de kleding $I_{cl} = 0,11 \text{ m}^2\text{°C/W}$, de volgende luchtsnelheden voor de grootste behaaglijkheid zorgen [3]:

voor $\theta_i \leq 23\text{°C}$: $v_{ar} = 0,05 \text{ m/s}$
 voor $\theta_i = 24\text{°C}$: $v_{ar} = 0,25 \text{ m/s}$
 voor $\theta_i = 25\text{°C}$: $v_{ar} = 0,50 \text{ m/s}$
 voor $\theta_i \geq 26\text{°C}$: $v_{ar} = 1,00 \text{ m/s}$

De bovengrens aan de luchtsnelheid van 1,00 m/s wordt zowel veroorzaakt door het feit dat dit een hoge waarde is om te realiseren, als door het feit dat de vergelijkingen van Fanger boven deze waarde niet meer gelden.

Dynamisch model

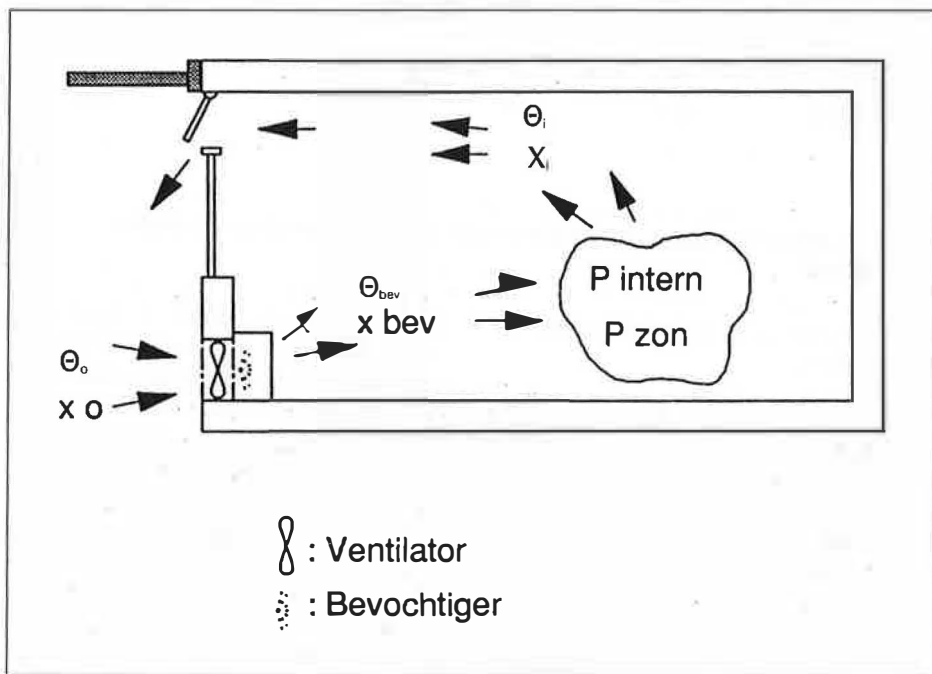
Om de mogelijkheden van de twee methoden om kantoorgebouwen te koelen en te **onderzoeken** is een dynamisch model in de programmeertaal C geschreven. Het is gebaseerd op een reeds bestaande simulatie van het Passief Klimaatstelsel [6,7]. Een eenvoudig schema van het model is in figuur 2 gegeven.

De buitenlucht met temperatuur θ_o en absolute vochtigheid x_o worden door een ventilator aangezogen en, indien noodzakelijk, bevochtigd. De conditie van de ingeblazen lucht is θ_{bev} en x_{bev} . De interne belasting en de zonbelasting

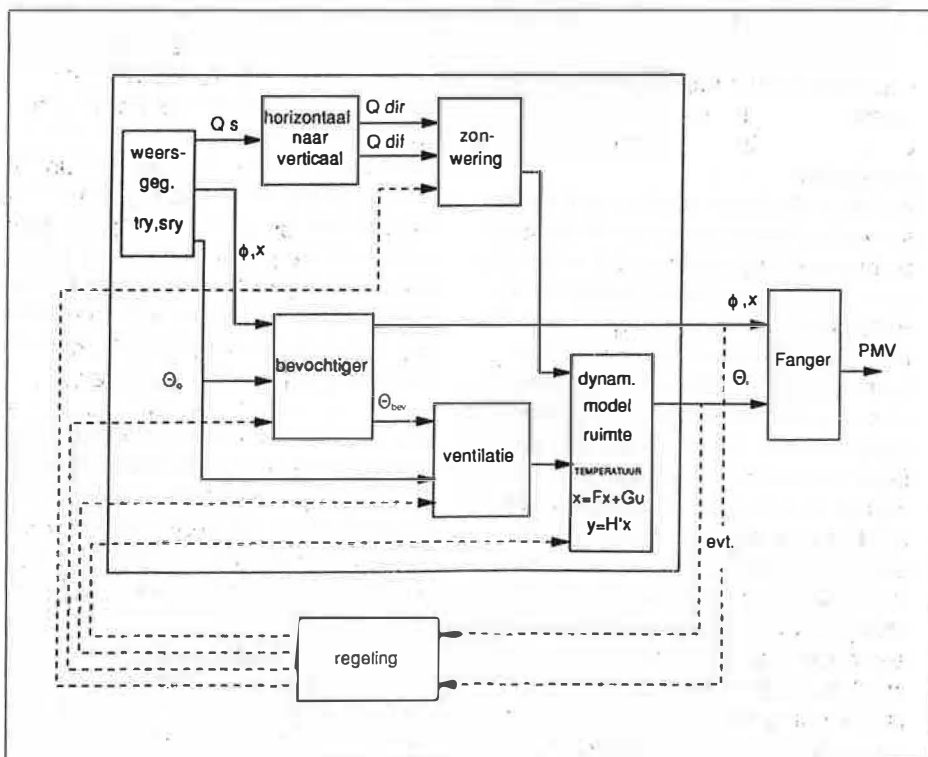
zorgen, samen met de responsie van de ruimte, voor de uiteindelijke conditie van de binnenlucht θ_i en x_i . De lucht wordt via een geopend raam weer afgevoerd. Dit is zeer belangrijk indien de bevochtiger aanstaat.

Een gratis weergave van het computerprogramma is in figuur 3 gegeven. De zonnestraling wordt gesplitst in een direct en een indirecte gedeelte. Afhankelijk van de stand van de zonwering resulteert dit in een input om de respons van de ruimte te berekenen. De temperatuur en de vochtigheid van de lucht

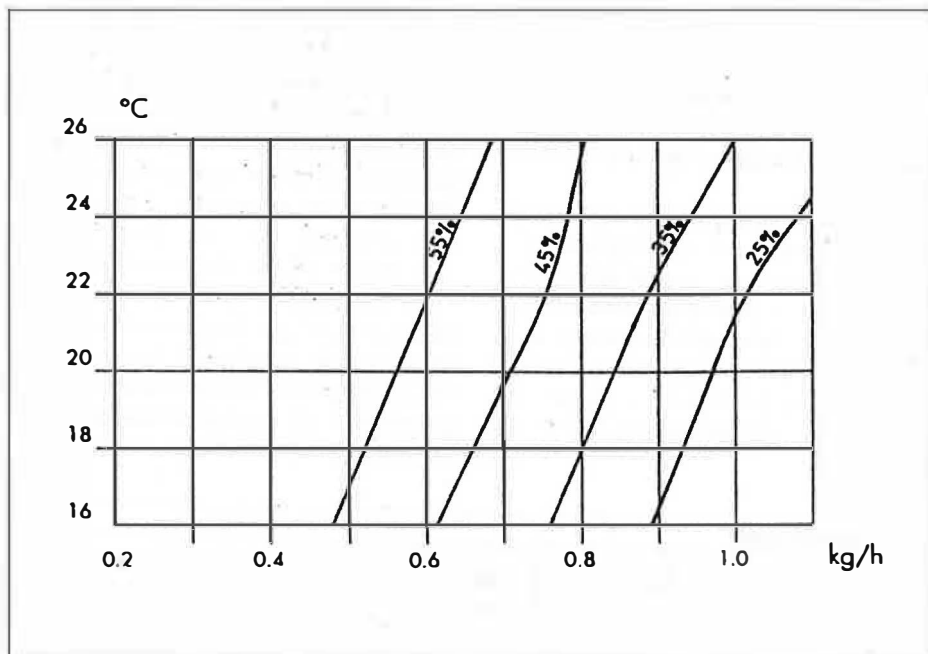
worden als ingang gebruikt om de bevochtiging of de ventilatie te bepalen. Voor de bevochtiger is uitgegaan van een bestaande koudverdampiger, namelijk de Defensor PH14. Zoals reeds gezegd is de bevochtigingscapaciteit afhankelijk van de temperatuur en de vochtigheid van de lucht. Dit verband is voor ventilatorstand 3 van de Defensor PH14 weergegeven in figuur 4. De temperatuur en vochtigheid na responsie van de ruimte worden gebruikt om de PMV te bepalen. Tevens dienen deze grootheden als ingang van de regeling.



Figuur 2. Koelen van een ruimte met een verdampingskoeler.



Figuur 3. Grafische weergave van het computerprogramma.



Figuur 4. Bevochtigingscapaciteit als functie van de temperatuur en relatieve vochtigheid.

Met de regeling wordt het volgende aangestuurd:

- verwarming
- zonwering
- ventilatie
- nachtventilatie
- bevochtiger

Bij de maximale stand van de ventilator en de bevochtiger is het luchtdebiet 500 m³/h.

Voor de regeling zijn drie verschillende mogelijkheden onderzocht:

- alleen op temperatuur;
- op temperatuur en relatieve vochtigheid;
- op temperatuur en absolute vochtigheid.

Resultaten

De beste resultaten worden verkregen bij regeling op temperatuur en relatieve vochtigheid. Het gebouw, dat in het programma is gesimuleerd bestaat uit vertrekken met een vloeroppervlak van 20 m², 40% raamoppervlak (5 m²) met buitenzonwering (ZTA=0,2), gesitueerd op het zuiden en voorzien van stenen tussenwanden. Wordt in vertrek geventileerd met 500 m³/h dan wordt bij een interne belasting van 7 W/m² nog juist voldaan aan de norm. Indien nu de bevochtigingsunit wordt ingezet dan is 24 W/m² toelaatbaar. De hier genoemde getallen zijn gebaseerd op de beoordeling van dit systeem met de PMV-grenzen van +/-0,5. Beoordeling op basis van het criterium "100 uren boven de 25,5 °C" levert belastingsgrenzen op die 5 W/m² hoger liggen.

Ter vergelijking met de eerder gepubliceerde resultaten over het Passief Klimaatstelsel [1], waarbij op natuurlijke wijze werd geventileerd, dient het volgende opgemerkt. Voor dit systeem is eerder vermeld, dat voor hetzelfde gebouw 15 W/m² kon worden geaccepteerd en met een voorspellende regeling zelfs 20 W/m², terwijl hier slechts 7 W/m² wordt genoemd. De oorzaak van dit verschil ligt in het feit dat bij het Passief Klimaatstelsel de hoeveelheid ventilatie hoger is dan bij het hier beschouwde systeem. (660 in plaats van 500 m³/h). Zou de capaciteit van de verdampingsunit worden opgevoerd tot eveneens 660 m³/h en een slimmer regelsysteem worden ingezet dan zou de interne belasting dus mogen toenemen tot 20 + (24 - 7) = 37 W/m². Passen we tevens een betere buitenzonwering toe met een ZTA van 0,1 dan komen we boven de 40 W/m² uit. Bij verhoging van de luchtsnelheid is 21 W/m² mogelijk om binnen de PMV band van +/-0,5 te blijven. Dit is dus een extra verhoging van 14 W/m².

Het toepassen van zowel de bevochtigingskoeling als het **verhogen** van de luchtsnelheid **verbetert** nauwelijks het koelend effect, dat gerealiseerd kan worden met de verdampingskoeling alleen. Het aantal uren overschrijding van de vochtigheidsgrenzen van de ASHRAE-standard 55-81 bedragen bij regeling op temperatuur en relatieve vochtigheid 112 uren per jaar. Zonder bevochtiging bedraagt dit 77 uren per jaar.

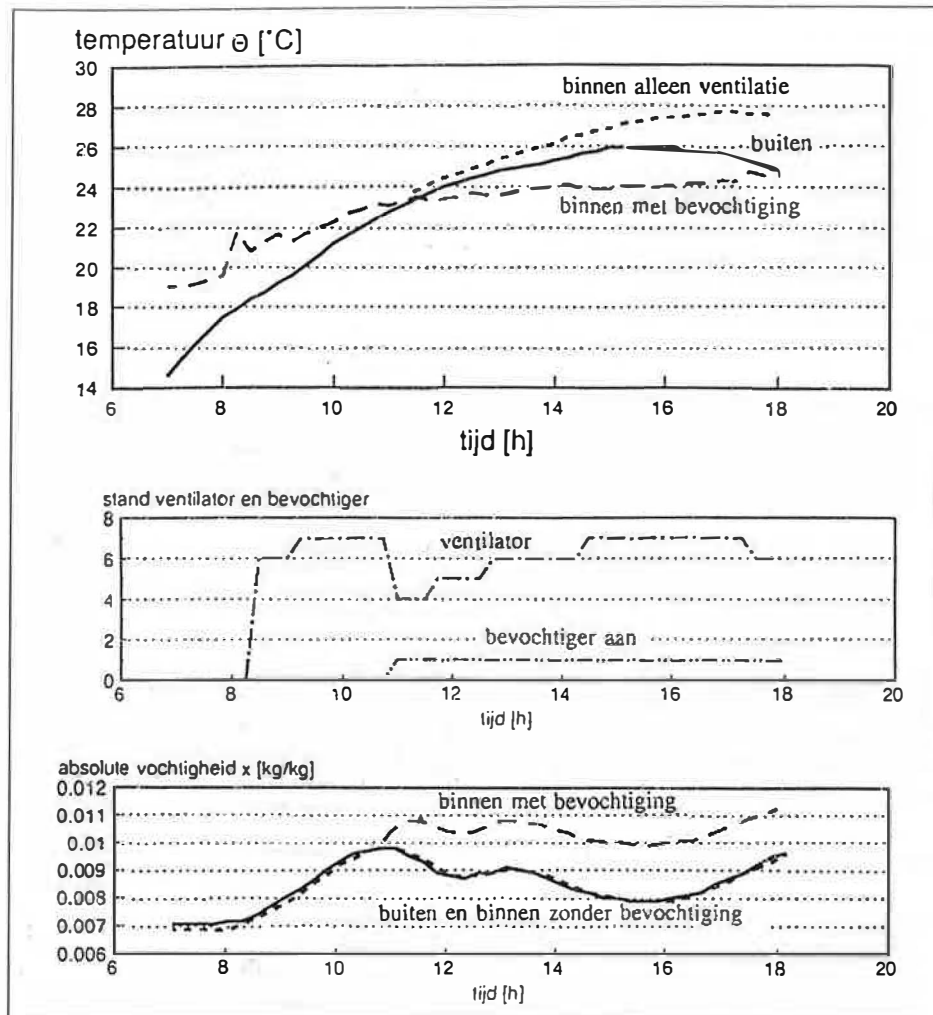
Om de mogelijkheid voor adiabatische bevochtiging te illustreren wordt naar figuur 5 verwezen. Hierin is het verschil in temperatuurverloop gegeven voor de situaties met en zonder bevochtiging. Hierbij dient wel te worden opgemerkt dat de conditie van de buitenlucht goed geschikt is om verdampingskoeling toe te passen.

Vergelijk statische- en dynamische berekening.

Er is ook een berekening gemaakt op basis van een statisch model van de warmtehuishouding van een gebouw-vertrek. Als invoer voor dit model zijn frequentieverdelingen gebruikt, die aangeven hoe vaak gemiddeld over een jaar de verschillende combinaties van temperatuur, absolute vochtigheid en globale zonnestraling voorkomen. Omdat de wijze waarop deze drie variabelen in een tabel zijn gecombineerd zeer inzichtelijk is en ook voor andere berekeningen gebruikt kan worden, is deze hier in kader 1 afgedrukt. De combinaties tussen de temperatuur en de vochtigheid zijn in hokjes verdeeld. In die hokjes worden 4 waarden vermeld. Linksboven staat het aantal uren dat die combinatie voorkomt. De overige waarden geven aan hoe vaak de combinatie is opgetreden bij bewolkt (zonnestraling van 0 tot 300 W/m²), half bewolkt (300 tot 600 W/m²) en helder weer (600 tot 900 W/m²).

Het is dus mogelijk een berekening te maken voor een proces, dat afhankelijk is van deze drie variabelen. Bijvoorbeeld in ons geval wordt een warmte- en massabalans van het vertrek met bevochtiger opgesteld. Voor ieder vakje worden nu desbetreffende waarden van de buitentemperatuur, de vochtigheid en de globale zonnestraling ingevuld en de binnentemperatuur uitgerekend. In kader 2 staan de formules vermeld waarmee de binnentemperatuur kan worden uitgerekend. Deze formules zijn af te leiden uit de warmte- en massabalans van het vertrek. Door de berekening voor alle vakjes uit te voeren kan het aantal malen dat een temperatuur gemiddeld genomen per jaar zal optreden door optellen worden bepaald, immers we weten precies hoe vaak elk vakje is opgetreden.

Met deze gegevens zijn met een spreadsheetprogramma de verschillende mogelijkheden doorgerekend. De onnauwkeurigheden zijn evident. Er wordt geen rekening gehouden met de dynamica van het gebouw en de regeling. Ook de keuze voor de berekeningen van de invallende zonnestraling is



Figuur 5. Dagverlopen met bevochtiging (streeplijn) en zonder bevochtiging (stippellijn)

| Relatie interne belasting en overschrijdingsuren bij verdampingskoeler Capaciteit: 1,2 l/h waterverdamping. Luchtdaet ventilatie: 500 m ³ /h | | | | |
|--|--|--|--|--|
| Interne belasting (W/m ²) | statisch model | | dynamisch model | |
| | Aantal uren $\theta_i > 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ | Aantal uren $\theta_i > 28 \text{ }^\circ\text{C}$ | Aantal uren $\theta_i > 25,5 \text{ }^\circ\text{C}$ | Aantal uren $\theta_i > 28 \text{ }^\circ\text{C}$ |
| 0 | 27 | 10 | 44 | 16 |
| 5 | 36 | 11 | 48 | 18 |
| 10 | 43 | 17 | 51 | 20 |
| 15 | 59 | 25 | 50 | 24 |
| 20 | 71 | 27 | 56 | 28 |
| 25 | 88 | 34 | 67 | 30 |
| 30 | 110 | 41 | 107 | 31 |

Tabel 1. Vergelijking van de resultaten van een statisch en dynamisch model

problematisch. Omdat de tijd niet is meegenomen, kan ook de zonshoogte niet worden gevarieerd. Men moet dus een "gelukkige" keuze doen voor de gemiddelde zonnestand. Hier is deze vrij groot gekozen (40 °), omdat we geïnteresseerd zijn in uiterste waarden. Deze tekortkomingen komen vooral tot uiting in berekeningen waarin de dynamica een zeer belangrijke rol speelt, zoals bij het bepalen van de begrenzingen van natuurlijke ventilatie. Er volgt als resultaat dat natuurlijke ventilatie bij

geen enkele interne belasting aan de eisen kan voldoen. Zou men een dempingsfactor van 0,3 hebben toegepast om de vertraging, waarmee de wanden de opvallende zonnestraling aan de vertreklucht afgeven, mee te nemen dan kornen de uitkomsten van de statische berekening beter overeen met die van de dynamische berekening. Dit geeft aan dat een handige rekenaar goede resultaten met een spreadsheet kan bereiken; echter twijfels over de nauwkeurigheid zullen er altijd blijven.

Het effect van de verdampingskoeling geeft wel goede resultaten. Dit komt door het feit dat het effect vrij direct is en veel minder afhankelijk is van het warmte-accumulerende vermogen van de wanden. Het waterverbruik is bij de statische berekening echter wel veel hoger, namelijk 500 l in plaats van 110 l per jaar die met de dynamische berekening is vastgesteld. De verklaring hiervoor is dat de regeling bij de dynamische simulatie de bevochtiger slechts een gedeelte van een tijdsperiode inschakelt. Bij de statische berekening staat de bevochtiger de volle tijdsperiode in als de gemiddelde belasting dit aangeeft.

Mogelijke uitvoeringsvormen

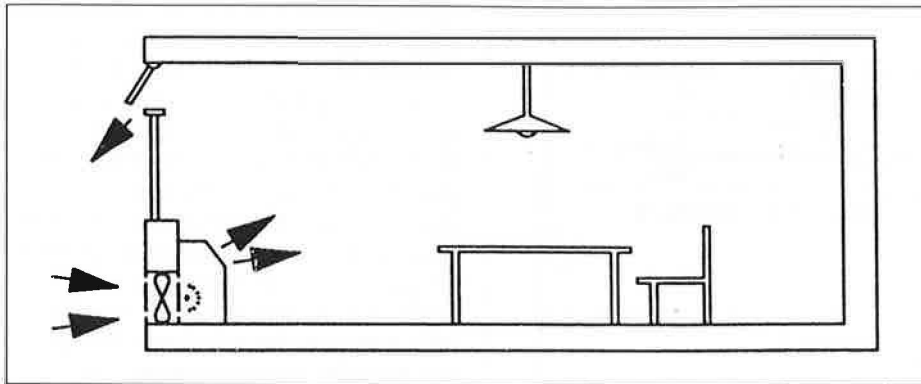
Nadelig is dat de lucht die bevochtigd is een zeer hoge relatieve vochtigheid heeft. Als deze lucht de bevochtiger verlaat zou dit tot vochtproblemen en zelfs tot condensatie kunnen leiden. Dit kan worden voorkomen door in de bevochtiger een gedeelte van de lucht wel te bevochtigen (primaire luchtstroom) en een gedeelte niet (secundaire luchtstroom). Als deze luchtstromen binnen de bevochtiger worden gemengd kunnen vochtproblemen buiten de bevochtiger worden voorkomen.

De verdampingskoeling kan op verschillende manieren in een ruimte worden geplaatst:

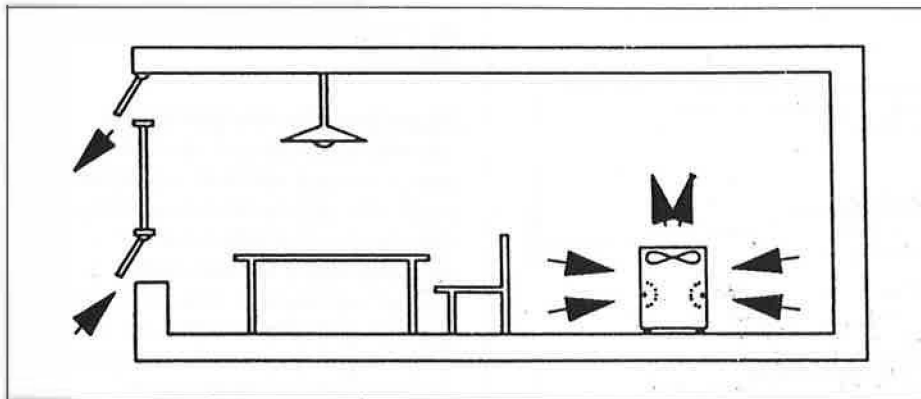
- Bevochtigungsunit in de gevel ingebouwd met afvoer via een open raam. De buitenlucht wordt aangezogen en dan bevochtigd. Er wordt dus mechanisch geventileerd. Dit zou gerealiseerd kunnen worden zoals in figuur 6 is aangegeven.
- Losse unit met natuurlijke ventilatie. Hierbij is het zowel mogelijk de ramen door de regeling te bedienen (Passief Klimatestroom [1]) als de ramen met de hand te openen. In dit laatste geval kan met behulp van een raamcontact worden voorkomen dat bevochtigd wordt als de ramen gesloten zijn. Een voorbeeld hiervan is weergegeven in figuur 7. Een verschil met het gebruikte model is dat de binnenlucht, die al is opgewarmd door de interne belasting en de zonbelasting, wordt bevochtigd. Door de hogere temperatuur kan nog meer worden bevochtigd.

Marktonderzoek

Om de vraag in de markt naar de beide methoden te onderzoeken is een marktonderzoek gehouden. Dit onderzoek is



Figuur 6. Realisatie van een verdampingskoeler met mechanische ventilatie.



Figuur 7. Realisatie van verdampingskoeling met natuurlijke ventilatie.

als stageopdracht bij Geveke Werktuigbouw b.v. vervuld. Geveke is importeur van Defensor luchtbevochtigingsapparatuur. In het kader van dit marktonderzoek zijn een aantal interviews afgenomen om de mening van enkele deskundigen te inventariseren. De interviews vonden plaats bij adviseurs, installatiebedrijven, opdrachtgevers, de overheid (Rijksgebouwendienst) en de ISSO. De volgende punten komen uit het marktonderzoek naar voren:

- Koeling door adiabatische bevochtiging wordt door de meeste respondenten niet als mogelijkheid gezien om te koelen. De meest genoemde redenen zijn:
 - * de te hoog oplopende vochtigheid
 - * onderhoud en de hygiëne in de koudverdampers zullen voor problemen zorgen.
- Een aantal respondenten ziet wel mogelijkheden. Qua uitvoeringsvorm gaat de voorkeur uit naar een apparaat dat in de ruimte wordt geplaatst in plaats van een in de gevel ingebouwd apparaat.
- Verhoging van de luchtsnelheid wordt unaniem niet als mogelijkheid gezien om te koelen.
- Er is echter wel een markt voor koelapparatuur, zoals koudverdampers en ventilatoren, die in kantoren worden geplaatst. Dit gebeurt achteraf als

door oplopende temperaturen of slecht ontwerp van de installatie de temperaturen te hoog oplopen. Adviseurs en installatiebedrijven hebben geen zicht op deze markt omdat de apparatuur in eigen beheer wordt aangeschaft.

Conclusies

Zowel het toepassen van adiabatische bevochtiging als het verhogen van de luchtsnelheid zijn goede mogelijkheden om een kantoorruimte te koelen. De interne belasting mag echter niet meer dan 24 resp. 21 W/m² bedragen, indien geventileerd wordt met 500 m³/h buitenlucht. Opvoeren van de capaciteit van de koelunit, het toepassen van een zeer goede buitenzonwering en een regelsysteem met een voorspellend vermogen kan in theorie de toelaatbare belasting vergroten tot 40 W/m². Van de verschillende manieren om adiabatisch te bevochtigen is koudverdampingskoeling het meest geschikt. Hierbij vindt geen kalkneerslag in de ruimte plaats. Bovendien is het ontbreken van een zichtbare nevelstraal een belangrijk psychologisch voordeel. Omdat de bevochtigingscapaciteit afhangt van de temperatuur en de relatieve vochtigheid kan de regeling eenvoudig blijven. Gevaar bestaat voor het ontstaan van bacteriën. Er zijn echter mogelijkheden om dit risico te verklei-

nen of zelfs te voorkomen. Toepassing van luchtbevochtiging kan ook worden gebruikt om 's winters het comfort te verhogen als de lucht te droog wordt. De airconditioner heeft de schadelijkheid van het koudemiddel en het hoge energiegebruik als nadeel. Omdat de zorg voor het milieu toeneemt zou dit in de toekomst kunnen leiden tot opkomst van adiabatische bevochtiging voor koeling.

Het verhogen van de luchtsnelheid met behulp van een ventilator is een milieuvriendelijke en nog eenvoudigere mogelijkheid om een kantoorruimte te koelen. De interne belasting mag dan echter niet zo hoog zijn als bij de adiabatische bevochtiging mogelijk is. Uit het marktonderzoek blijkt echter dat er geen of slecht geringe vraag naar de beide methoden is. Voor koudverdamping zijn wellicht mogelijkheden als het systeem zich in een proefproject heeft bewezen.

Literatuuropgave

1. Paassen, A.H.C. van, P.J. Lute, 'Natural Ventilation and Automation with manual overriding are healthy Solutions'. TVVL-Rehva, Symposium "Healthy Buildings in relation to Building Services", 17-20 februari 1992, Utrecht, The Netherlands.
2. ASHRAE handbook 1982 Applications, Chapter 16 page 7.
3. International Standard ISO 7730, 'Moderate thermal environments-Determination of the PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort'. First edition 1984-08-15.
4. Brouwers, G.F.M., A.C. van der Linden, 'Beoordeling van het thermische binnenklimaat'. Klimaatbeheersing 18 (1989) nr 7 (juli).
5. Hooft, E.N. 't, C.P.G. Roelofs, 'Richtlijnen voor het thermisch binnenklimaat'. Klimaatbeheersing 20 (1991) nr 1 (januari).
6. Paassen, A.H.C. van, S.H. Liem, P.J. Lute, 'Digital Control Systems for Passive Solar Buildings'. MEMT 8, Technical University of Delft, 1990.
7. Lute, P.J., S.H. Liem, A.H.C. van Paassen, 'Control of Passive Indoor Climate Systems with Adjustable Shutters, Shading Devices and Vent Windows'. MEMT 12, Technical University of Delft, 1990.
8. Ham, Ph. J., 'Mollier-h/x diagrammen voor vochtige lucht, geconstrueerd door middel van de computer'. Klimaatbeheersing 13 (1984) nr 8 (augustus).

Kader 1.

Data voor spreadsheet.

| | | Absolute vochtigheid (g/kg) | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|--|----|-----------------------------|---|---|---|----|---|----|----|----|----|----|----|----|----|----|---|----|---|----|---|----|---|--|
| | | 4 | | 5 | | 6 | | 7 | | 8 | | 9 | | 10 | | 11 | | 12 | | 13 | | 14 | | |
| T e m p e r a t u r (°C) | 32 | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| | 31 | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | | | | | | |
| | 30 | | | | | | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 29 | | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | | | | | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | 28 | | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | | |
| | | | | | | | | | | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | | | | 1 | | |
| | 27 | | | | | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | | |
| | | | | | | | | | | | | | | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | | 1 | |
| | 26 | | | | | | | 2 | 1 | 4 | 2 | 3 | 2 | 5 | 3 | 5 | 2 | 2 | 1 | 2 | 1 | 1 | | |
| | | | | | | | | | 1 | | 2 | | 1 | | 2 | 1 | 2 | | 1 | | 1 | | | |
| | 25 | | | | | | | 2 | 1 | 3 | 2 | 3 | 2 | 5 | 2 | 5 | 2 | 4 | 1 | 2 | | | | |
| | | | | | | | | | 1 | | 1 | | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 1 | 2 | | 1 | | | |
| 24 | | | | | 2 | 2 | 2 | 1 | 5 | 2 | 7 | 4 | 9 | 4 | 8 | 3 | 5 | 2 | 3 | 1 | | | | |
| | | | | | | 1 | 1 | 2 | 1 | 2 | 2 | 3 | 1 | 4 | 1 | 4 | 1 | 2 | 1 | 1 | | | | |
| 23 | | | 1 | 1 | 3 | 2 | 3 | 1 | 5 | 3 | 8 | 3 | 9 | 4 | 9 | 2 | 8 | 2 | 2 | | | | | |
| | | | | | | 1 | | 2 | | 2 | 2 | 3 | 1 | 4 | 2 | 5 | 1 | 3 | 1 | 1 | | | | |
| 22 | | | 2 | 1 | 5 | 3 | 5 | 2 | 9 | 4 | 12 | 4 | 13 | 3 | 14 | 3 | 8 | 1 | 4 | | 1 | | | |
| | | | | 1 | | 2 | 1 | 2 | 1 | 4 | 2 | 6 | 4 | 6 | 4 | 7 | 3 | 4 | 2 | 2 | 1 | | | |
| 21 | | 1 | 1 | 4 | 2 | 4 | 2 | 6 | 4 | 9 | 4 | 14 | 4 | 14 | 2 | 13 | 1 | 10 | 1 | 4 | | | | |
| | | | | 1 | 1 | | 2 | | 2 | 1 | 4 | 2 | 8 | 4 | 8 | 5 | 7 | 5 | 4 | 3 | 1 | | | |
| 20 | | 3 | 2 | 4 | 2 | 8 | 4 | 16 | 5 | 24 | 8 | 29 | 6 | 28 | 4 | 19 | 1 | 10 | | 3 | | | | |
| | | | 1 | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 9 | 3 | 13 | 7 | 16 | 9 | 15 | 10 | 8 | 7 | 3 | 3 | | | | |
| 19 | | 3 | 1 | 4 | 2 | 11 | 4 | 20 | 6 | 30 | 8 | 30 | 4 | 20 | 1 | 14 | | 6 | | 1 | | | | |
| | | | 2 | | 2 | 2 | 5 | 4 | 10 | 7 | 15 | 10 | 16 | 8 | 11 | 10 | 4 | 5 | 1 | 1 | | | | |
| 18 | | 4 | 2 | 7 | 3 | 15 | 6 | 28 | 8 | 43 | 8 | 36 | 3 | 33 | | 18 | | 5 | | | | | | |
| | | 1 | 1 | 1 | 3 | 2 | 7 | 6 | 14 | 12 | 23 | 15 | 18 | 20 | 13 | 15 | 3 | 6 | | | | | | |

| | |
|------------------------------------|--------------------------------------|
| Totaal aantal uren | aantal uren 600-900 W/m ² |
| aantal uren 0-300 W/m ² | aantal uren 300-600 W/m ² |

Frequentie van het gelijktijdig voorkomen van temperatuur en vochtigheid bij verschillende zonnestralingsklassen (uren per jaar)

Kader 2.

Formules voor statische berekening met een spreadsheet

$$\Theta_i = \Theta_o + \eta(\Theta_{\text{verz}} - \Theta_o) \frac{P_{\text{intern}} \cdot A_{\text{vloer}} + P_{\text{zon}}}{\rho_l \cdot \phi_r \cdot C_p}$$

$$X_i = X_o + \eta(X_{\text{verz}} - X_o)$$

$$\varphi_i = \frac{\frac{101,33 \cdot x_i}{0,622 + x_i}}{\frac{\Theta_i}{0,1813 \cdot e^{\frac{176}{\Theta_i} - 0,2}}}$$

$$P_{\text{zon}} = k_s \cdot \text{ZTA} \cdot I_{\text{glas}} \cdot A_{\text{raam}}$$

$$I_{\text{glas}} = \cos \phi \cdot I_{\text{dir}} + 0,5 \cdot I_{\text{dif}} + 0,2 \cdot I_{\text{grond}}$$

Benadering (helder weer)

$$I_{\text{glas}} = \cos 40^\circ \cdot 0,8 \cdot I_{\text{glob}} + 0,5 \cdot 0,2 \cdot I_{\text{glob}} + 0,2 \cdot 0,2 \cdot I_{\text{glob}} \approx 0,75 \cdot I_{\text{glob}}$$

(I_{glob} verdeeld in drie klassen 0 – 300; 300 – 600 en 600 – 900 W/m²)

$k_s = 1$ bij berekening; beter zou zijn geweest $k_s = 0,3$

$$\Theta_{\text{verz}} = 27,8 \ln \frac{\Theta_o + 2500 \cdot x_o + 1,86 \cdot x_o \cdot \Theta_o + 36}{45,5} \quad X_{\text{verz}} = \frac{622(0,813 \cdot e^{\frac{\Theta_{\text{verz}}}{176} - 0,2})}{101,33 - (0,813 \cdot e^{\frac{\Theta_{\text{verz}}}{176} - 0,2})}$$

Gebruik is gemaakt van de formules uit het artikel van Ham [8]

| | | |
|------------------------|--|----------------------|
| Θ_i | = binnentemperatuur van de lucht | (°C) |
| x_i | = absolute vochtigheid van de lucht in het gebouw | (g/kg) |
| Θ_o | = buitentemperatuur | (°C) |
| x_o | = absolute vochtigheid buiten | (g/kg) |
| ρ_l | = soortelijke dichtheid lucht | (kg/m ³) |
| ϕ_r | = debiet toegevoegde ventilatielucht | (m ³ /s) |
| C_p | = soortelijke warmte van de lucht | (J/(kg · K)) |
| Θ_{verz} | = temperatuur die ontstaat na adiabatische bevochtiging van de lucht tot het verzadigingspunt | (°C) |
| X_{verz} | = idem voor de absolute vochtigheid | (g/kg) |
| η | = bevochtigingsrendement (hier 50% gekozen) | |
| P_{intern} | = warmte afkomstig van personen/verlichting en machines per m ² vloeroppervlak | (W/m ²) |
| P_{zon} | = zonbelasting | (W) |
| A_{raam} | = raamoppervlak (hier 5 m ²) | (m ²) |
| A_{vloer} | = vloeroppervlak (hier 20 m ²) | (m ²) |
| I_{glob} | = globale zonnestraling = totale zonnestraling op een horizontaal vlak (zie tabel met frequenties van voorkomen) | (W/m ²) |
| k_s | = accumulatie (storage-/dampings) factor (uitdamping halve sinusvariatie van opvallende zonnestraling) | |
| I_{dir} | = directe zonnestraling (invallend onder een hoek β t.o.v. het grondoppervlak) | (W/m ²) |
| I_{dif} | = diffuse straling | |
| I_{grond} | = door de grond gereflecteerde zonnestraling | (W/m ²) |
| I_{glas} | = loodrecht op glas vallende zonnestraling | |
| ZTA | = zontoetredingsfactor | |
| β | = invalshoek directe zonnestraling op horizontale vlak | (°) |
| φ_i | = relatieve vochtigheid bij temperatuur Θ_i en absolute vochtigheid x_i | (-) |