

## Ontwerpevaluatie via simulatie van gekoppeld warmte- en luchttransport: twee praktijkvoorbeelden

dr. ir. J. Hensen

Technische Universiteit Eindhoven; Vakgroep FAGO HG 11.77  
Postbus 513  
5600 MB Eindhoven

### Samenvatting

Computersimulatie van bijvoorbeeld luchttransport kan als hulpmiddel dienen bij het ontwerpen. In deze bijdrage wordt ingegaan op praktijktoepassingen van ESP<sup>R</sup>. Dit is een simulatie-omgeving voor energietransport in gebouwen, waarmee onder andere gekoppeld warmte- en luchttransport - zoals wordt aangetroffen in gebouwen en/of installaties - kan worden geanalyseerd. Het gebruik hiervan wordt gedemonstreerd aan de hand van twee praktijkvoorbeelden. Het eerste praktijkvoorbeeld wordt ook aangewend om enkele theoretische aspecten van gekoppeld warmte- en massatransport te verduidelijken. Het tweede voorbeeld is meer gericht op praktische mogelijkheden. Deze bijdrage beschrijft in het kort de achterliggende theorie van de simulatiemethode en het gebruik hiervan in de context van bouwkundige prestatiebeoordeling. Voor beide praktijkvoorbeelden wordt met name ingegaan op de mate waarin het bouwkundig ontwerp wordt geabstraheerd, op de keuze met betrekking tot welke simulaties worden uitgevoerd, op de analyse van de simulatieresultaten en op de hieruit voortvloeiende consequenties voor het ontwerp.

### 1 Inleiding

ESP<sup>R</sup> is een op onderzoek georiënteerde gebouw- en installatie-simulatie-omgeving. Het doel is om de werkelijkheid zo nauwkeurig mogelijk te simuleren. De nauwkeurigheid waarmee bepaalde deelaspecten worden benaderd, is afhankelijk van internationale onderzoeksinspanningen c.q. -resultaten voor die specifieke onderdelen. De huidige staat van de simulatie-omgeving is het resultaat van een jarenlange evolutie die erop gericht is om steeds de meest recente technieken en methoden op te nemen. Deze moeten dan wel 'toepasbaar' zijn, hetgeen betekent dat de nieuwe techniek algemene geldigheid moet hebben en dat er een zekere mate van internationale consensus over moet zijn. Het uitgangspunt is om alle warmte- en massastromen in gebouw en installatie (en hun onderlinge afhankelijkheden) zo volledig mogelijk in rekening te brengen. Het programma biedt zo de mogelijkheid tot prestatiebeoordeling van gebouw en installatie in termen van energiegebruik en kwaliteit van het binnenmilieu (thermische behaaglijkheid). Het is specifiek geschikt voor onderzoek waarbij de interactie van warmte- en massatransport een belangrijke rol speelt.

In die zin is ESP<sup>R</sup> ook toegepast en uitgebreid in het kader van een recent 'afgesloten' promotieonderzoek betreffende de thermische interactie tussen gebouw en (verwarmings-)instal-

latie (Hensen 1991). Een gedeelte van dit werk betrof het ontwikkelen van een nieuwe module voor onderzoek naar de consequenties voor energiegebruik en behaaglijkheid ten gevolge van massastromen zoals die in een bouwkundige context voorkomen. Het betreft hier een module voor simulatie van één-dimensionaal massatransport (momenteel lucht en/of water) in een gebouw- en/of installatieconfiguratie. De gebruikte methode lost in essentie de massabalans op in een netwerk, waarvan de knooppunten onbekende c.q. randvoorwaarde drukken voorstellen en waarvan de takken de verschillende 'stroompaden' representeren. Bij het simuleren kan men zich concentreren op alleen het massastroomprobleem (door de zelfstandige 'mass flow solver' module *mfs* te gebruiken) maar, zeker zo belangrijk, ook op gekoppelde problemen (door gebruik te maken van de centrale gebouw- en installatiesimulatiemodule *bps* en de daarin geïntegreerde versie van *mfs*). In het laatste geval is het mogelijk om energetisch en behaaglijkheidsonderzoek te doen voor gecombineerde gebouw- en installatieconfiguraties waarbij de massastromen kunnen variëren met de tijd; bijvoorbeeld door variërende randvoorwaarden (zoals winddrukken) of door variërende eigenschappen van de verbinding (zoals in het geval van regelkleppen etc.). Hierna wordt eerst een korte beschrijving van de gehanteerde methode gegeven. Daarna worden gebruik van het systeem en de voordelen voor het ontwerp gedemonstreerd aan de hand van twee praktijkvoorbeelden. Tenslotte worden enkele conclusies met betrekking tot toekomstig werk aangegeven.

### 2 Korte beschrijving toegepaste methode

In eerdere publikaties is al een volledige beschrijving gegeven van de werking van het systeem. Dit geldt zowel voor energie-simulatie in bredere zin (Clarke 1985), als meer specifiek voor simultane simulatie van warme en massatransport (Clarke en Hensen 1991, Hensen 1991). Een zeer korte beschrijving van de in ESP<sup>R</sup> toegepaste benadering zou kunnen zijn: binnen iedere simulatietijdstap, blijft massatransport beperkt tot stationaire stroming (mogelijkerwijze in twee richtingen) van een niet-samendrukbaar medium door verbindingen die het gebouw/installatiemassastroomnetwerk voorstellen en waarvoor randvoorwaarden met betrekking tot druk en/of stroming gelden. Het probleem wordt hierdoor vereenvoudigd tot het berekenen van de stroming door deze takken waarbij de knopen van het netwerk bepaalde drukken voorstellen. Dit wordt bereikt met een iteratieve massabalansmethode, waarbij de onbekende drukken worden aangepast totdat het massastroom-onbalans in iedere interne knoop voldoet aan door de gebruiker opgelegde criteria.

Informatie over mogelijke massastromen wordt door de gebruiker gegeven in termen van knoopbeschrijvingen, soort medium, type stromingsverbinding (feitelijk de druk-volume-

In deze context slaat ESP<sup>R</sup> op de research versie van de simulatie-omgeving, zoals die momenteel in ontwikkeling is bij diverse Europese instituten, waaronder de University of Strathclyde en de Technische Universiteit Eindhoven.

stroomkarakteristiek), koppelingen en randvoorwaarden. Op deze manier wordt een netwerk van knopen en 'verbindingsweerstand' gedefinieerd. Voor bepaalde knopen van dit netwerk (bijvoorbeeld die aan de randen) wordt een bekende druk opgegeven of ze worden 'gekoppeld' aan een set drukcoëfficiënten die de relatie beschrijven tussen windsnelheid en -richting 'in het vrije veld' en de daarmee samenhangende winddruk op een specifiek gebouwvlak. Zo'n netwerk mag verschillende afzonderlijke subnetwerken hebben en is ook niet beperkt tot slechts één type medium. Uiteraard moeten alle knopen en takken binnen een subnetwerk met hetzelfde medium (water, lucht, ..) te maken hebben.

Een knooppunt representeert bijvoorbeeld een (gedeelte van een) vertrek, een installatiecomponent, een verbindingpunt in een kanaal of leiding, buitencondities, enz. Stromingselementen corresponderen met afzonderlijke 'openingen' zoals deuropeningen, kieren en spleten, kanalen, leidingen, ventilatoren, pompen, etc. Ter illustratie is in figuur 1 schematisch een gedeelte van een woning weergegeven, bestaande uit vier vertrekken, luchtstromingsverbindingen tussen de vertrekken onderling en met buiten en een afzuigventilatiesysteem.

Op punten is aangegeven hoe deze configuratie in een massastroom netwerk zou kunnen worden vertaald. In dit voorbeeld omvat de gebouw- en installatieconfiguratie slechts een massastroomnetwerk, omdat er in dit geval maar één stromingsmedium is; namelijk lucht.

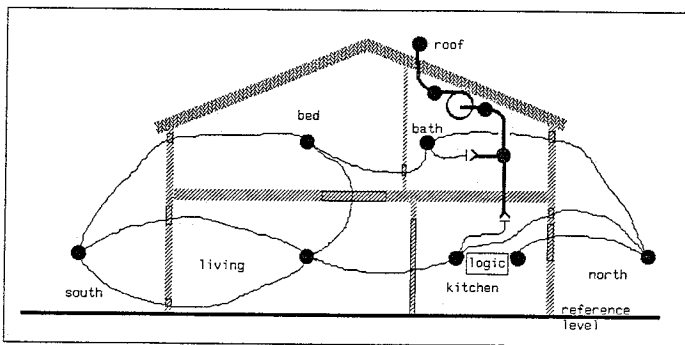


Fig. 1. Voorbeeld schema van gebouw en installatie

Koppelen van het warmte- en massatransport door gebouw en/of installatie komt in mathematisch/numerieke zin neer op het combineren van de energie- en massabalansmatrixvergelijkingen van gebouw en installatie (Clarke 1985). Overigens gebruiken we voor luchtstroming minimaal twee massabalansmatrixvergelijkingen omdat er feitelijk twee media zijn: droge lucht en waterdamp. In principe is het mogelijk om alle afzonderlijke matrixvergelijkingen te combineren tot een grote 'super-matrix'. In ESP<sup>R</sup> wordt dit niet gedaan, voornamelijk vanwege de voordelen voortvloeiend uit probleemopdeling. Het meest directe voordeel is de aanzienlijke verkleining van de matrices en de vergroting van de vulfactor, waardoor het geheugengebruik en rekentijd sterk worden verminderd. Een tweede voordeel is dat, afhankelijk van het voorliggende probleem, gemakkelijk een of meerdere matrixvergelijkingen buiten beschouwing kunnen worden gelaten; bijvoorbeeld als het alleen een gebouw betreft of alleen een installatie, alleen installatie en massastroming enz. Een derde voordeel is dat verschillende oplossingsmethoden kunnen en worden gebruikt voor de verschillende matrixvergelijkingen,

die specifiek zijn gericht op het type vergelijkingen: sterk niet-lineair, differentieel, enz. We moeten echter ook rekening houden met (soms zeer sterke) thermodynamische en/of hydraulische koppelingen tussen de afzonderlijke matrixvergelijkingen. Als een variabele in een vergelijking (bijvoorbeeld de luchttemperatuur van een vertrek) afhangt van een variabele die in een andere vergelijking wordt opgelost (bijvoorbeeld de luchtstroming tussen vertrekken), dan is het belangrijk dat beide waarden overeenkomen om de thermodynamische integriteit van het totale probleem te kunnen waarborgen. Zoals nader beschreven in de bovenvermelde referenties, heeft ESP<sup>R</sup> een aantal mechanismen waarmee deze thermodynamische integriteit wordt gewaarborgd, zoals iteratie en automatische aanpassing van de simulatietijdstap.

### 3 Toepassing van simulatie van luchtstroming bij ontwerpen

Het gebruik van het systeem in de context van gebouwevaluatie en de hieruit voortvloeiende voordelen met betrekking tot het ontwerp, worden gedemonstreerd aan de hand van een tweetal praktijkvoorbeelden. Bij het eerste voorbeeld worden ook nog ingegaan op enkele theoretische aspecten van gekoppeld warmte- en massatransport, terwijl het tweede voorbeeld zich meer richt op praktische (on)mogelijkheden. Beide studies werden feitelijk uitgevoerd binnen het kader van praktisch advieswerk. Afgezien van de rest, wordt met deze voorbeelden ook de behoefte in de praktijk aangetoond voor simulatiegereedschap zoals ESP<sup>R</sup>. Voor de gereedschapontwikkelaars, zijn dit soort toepassingen belangrijk omdat ze inzicht verschaffen in wat nodig is voor de praktijk en omdat hierdoor het systeem verder wordt ontwikkeld en meer robuust wordt gemaakt.

#### 3.1 Voorbeeld 1: Binnenmilieu aspecten van een medisch dagverblijf

In dit eerste geval ging het feitelijk om een binnenmilieutechnische beoordeling van enkele ruimten in een ziekenhuis in Schotland. Het betrof een situatie waarbij luchtstromingen kritisch waren voor wat betreft het voorkomen van temperatuuroverschrijdingen in de zomersituatie (Hand 1990; Hensen 1991). Figuur 2 toont het betreffende gedeelte van het ziekenhuis, bestaande uit een dagverblijf en aangrenzende eetruimte. Zoals te zien, bestaat een groot gedeelte van het dagverblijf uit glas.

Er werd gevraagd om advies over hoe het gebouw te gebruiken en/of eventueel aan te passen, zodanig dat oververhitting in de zomer voorkomen zou kunnen worden. De volledige studie hield een groot aantal simulaties in, waarbij diverse aspecten werden beschouwd waaronder beschaduwing. Hier beperken we ons echter tot slechts een onderdeel, namelijk infiltratieanalyse door middel van gekoppeld warmte- en massatransport. Na vermindering van zoninstraling is de meest voor de hand liggende methode om oververhitting in de zomer te voorkomen 'gratis koeling' door het infiltratiedebiet (luchtstroming) te vergroten. Dit kan bijvoorbeeld worden bereikt door het openen van ramen. Zowel het resulterende koelvermogen van de infiltratielucht als de binnenluchttemperatuur zijn afhankelijk van het temperatuurverschil tussen binnen en buiten en van de infiltratiedebieten. Bij thermische gebouwsimulaties

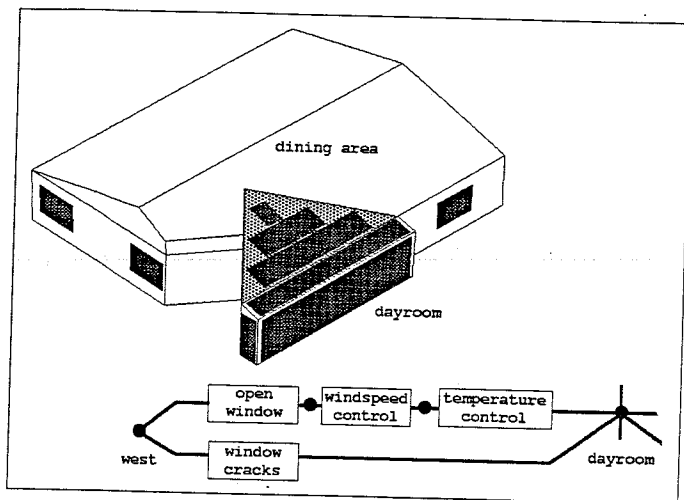


Fig. 2. Schematische weergave van het dagverblijf en aangrenzende eetruimte, gezien vanuit het zuidwesten. Diagram van klein gedeelte van het massastroomnetwerk, dat het raam in de westgevel van het dagverblijf representeert.

was het tot nu toe zeer problematisch en tijdrovend om de infiltratiedebieten realistisch in rekening te brengen. De belangrijkste reden hiervoor is dat het infiltratiedebiet afhankelijk is van drukverschillen die worden veroorzaakt door zowel de wind als door het zogenaamde schoorsteen-effect ten gevolge van temperatuurverschillen. Vooral bij een niet-geregelde binnenluchttemperatuur (zoals hier het geval is) zijn warmte-afvoer en luchtstroming zeer sterk gekoppeld. Voor het dagverblijf en de eetruimte werd een thermisch simulatiemodel opgesteld. Daarnaast werd een massastroomnetwerk gedefinieerd met knopen voor het dagverblijf en de eetruimte op twee verschillende hoogten om verticale temperatuurstratificatie in rekening te kunnen brengen en met knopen die de winddrukken op de verschillende gevels representeren. Deze knopen zijn onderling verbonden met stromingselementen die interne verbindingen (deuren etc.) of infiltratie-Openingen (kieren e.d.) in de gebouwschil voorstellen. Ook de ramen worden door stromingselementen gerepresenteerd. Om het effect van openen of sluiten daarvan te kunnen bestuderen, werden extra stromingselementen, die een logische regeling voorstellen, in serie met de ramen geplaatst. In figuur 2 is dit aangegeven voor het raam in de westgevel. Met de logische stromingsregelaars kan de invloed van de bewoners, met betrekking tot het openen van ramen, worden gesimuleerd. Er werden diverse opties bekeken. In een specifiek geval, bijvoorbeeld, werd ervan uitgegaan dat de ramen zouden worden geopend als de luchttemperatuur van de dagruimte of van de eetruimte tussen 11.00 en 18.00 uur hoger is dan 24 °C. Tegelijkertijd werd er daarbij echter vanuit gegaan dat de west- en zuid-georiënteerde ramen niet zouden worden geopend bij teveel wind. Daartoe werden in het netwerk extra logische stromingselementen aangebracht die het raam gesloten houden als de windsnelheid hoger is dan 6 m/s. Uiteraard is dit slechts een specifiek voorbeeld en kunnen naar believen andere waarden en/of strategieën worden gekozen. Om het resulterende effect voor de te verwachten luchttemperaturen te kunnen voorspellen, werden diverse simulaties uitgevoerd. Hierbij werd steeds gebruikgemaakt van *bps* en de

daarin geïntegreerde versie van *mfs*. De simulaties zijn dus gebaseerd op simultane en continue simulatie van warmteoverdracht en luchtstroming. Opgemerkt dient te worden dat dit al een veel betere benadering is dan gebouwsimulatie op basis van infiltratie/ventilatie-debieten die op afzonderlijke wijze zijn bepaald. Dit laatste is de gangbare praktijk tot nu toe. Figuur 3 toont de voorspelde waarden van de binnenluchttemperatuur voor 7 en 8 juli van een referentiejaar. Hierbij zijn verschillende imaginaire raamgebruikstrategieën onderzocht: (1) de ramen zijn steeds dicht en (2) het raam wordt geopend als functie van de tijd en windsnelheid. Deze twee gevallen zouden tenminste onder- en bovengrenzen opleveren voor de te verwachten binnentemperaturen, indien simulatie van gekoppeld warmte- en massatransport niet mogelijk zou zijn geweest. Met het huidige simulatiesysteem kan ook het effect van meer geavanceerde gebruikstrategieën worden voorspeld. Een derde gebruikstrategie omvatte bijvoorbeeld niet alleen regeling op basis van tijd en een randvoorwaarde zoals windsnelheid, maar hield tevens rekening met de binnentemperatuur, hetgeen uiteraard realistischer is dan de vorige twee mogelijkheden. De bijbehorende resultaten zijn ook weergegeven in figuur 3. Zoals te zien, zijn de resultaten voor 7 juli vrijwel identiek aan die voor regeling op basis van alleen de windsnelheid, omdat de binnentemperatuur gedurende de gehele periode tussen 11.00 en 18.00 uur hoger was dan 24 °C. Voor 8 juli zijn er echter aanzienlijke verschillen omdat dit een dag is waarbij de regeling op temperatuur werkelijk 'nodig' was.

Op 8 juli was de windsnelheid gedurende de gehele regelperiode hoger dan 6 m/s en werden de west- en zuid-georiënteerde ramen dus niet geopend. De sterke luchttemperatuurdaling voor het geval van regeling op basis van alleen de windsnelheid, is ook niet veroorzaakt door een toename van de infiltratie maar is het gevolg van luchtstroming van de eetruimte naar de dagruimte (omdat de noord- en oost-georiënteerde ramen wel werden geopend, veranderde de hoofd-luchtstroming door het gebouw van 'zuidwest naar noordoost' in 'noord naar oost'). Dit wordt duidelijk uit figuur 4, waarin de

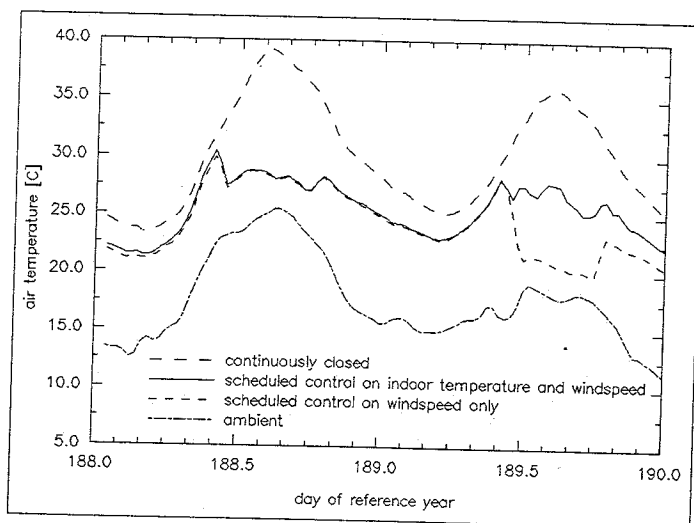


Fig. 3. Voorspelling luchttemperaturen in de dagruimte voor 7 en 8 juli, uitgaande van verschillende raamgebruikstrategieën

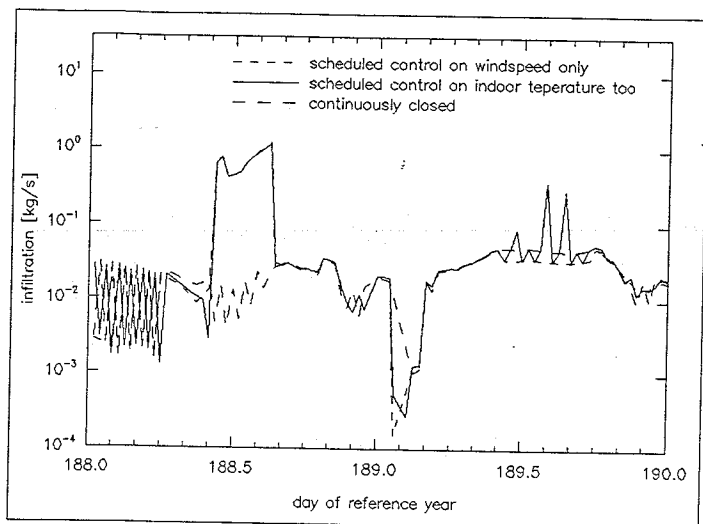


Fig. 4. Voorspelling infiltratiedebiet van de dagruimte voor 7 en 8 juli, uitgaande van verschillende raamgebruikstrategieën

voorspelde waarden van het ventilatiedebiet van de dagruimte uitgezet. Uiteraard zijn er zoals bij de luchttemperaturen, aanmerkelijke verschillen tussen de verschillende raamgebruikstrategieën. Infiltratie is hier overigens gedefinieerd als buitenlucht die rechtstreeks het vertrek binnenkomt; dat wil zeggen in het geval van de dagruimte wordt buitenlucht via de eetruimte niet bij infiltratie geteld. Omdat buitenlucht de dagruimte kan binnenkomen via het dak en de oost- en westramen, komen er infiltratiedebieten voor die op het eerste gezicht uitzonderlijk lijken. Zo worden de twee pieken op 8 juli (regeling ook op basis van temperatuur) veroorzaakt door het feit dat het oostraam wordt geopend vanwege de hoge binnentemperaturen. In dat geval stroomt er lucht binnen via dat raam, terwijl bij de andere twee gebruikstrategieën op hetzelfde tijdstip lucht via dat raam naar buiten zou stromen door de dan heersende buitencondities. Dit voorbeeld illustreert de complexiteit van luchtstromingen door het gebouw als functie van windsnelheid en -richting, binnentemperaturen en bewonersinvloed. Uit analyse van de resultaten was het mogelijk om een goede gebruikstrategie te adviseren in combinatie met minimale wijzigingen aan het ontwerp en de installatie terwijl toch het gewenste binnenklimaat zou kunnen worden verwezenlijkt.

In het voorgaande werden de luchtstromingen steeds berekend op basis van de 'werkelijke' binnentemperaturen en dus op basis van gekoppeld warmte- en massatransport. Om het belang hiervan aan te kunnen geven, zijn er ook enkele simulaties uitgevoerd waarbij de volgende twee gevallen werden vergeleken: (1) de binnentemperaturen verlopen volgens vooraf 'bepaalde' waarden en (2) de binnentemperaturen zijn zoals voorspeld door het thermische gebouw-simulatieprogramma. Het drukverschil door temperatuurverschil tussen binnen en buiten wordt dus in beide gevallen in rekening gebracht. Echter alleen in het tweede geval worden variërende temperatuurverschillen (zowel ten opzichte van buiten als tussen de vertrekken onderling) in rekening gebracht. Het eerste geval is dus een voorbeeld van 'constante' drukverschillen ten gevolge van temperatuurinvloeden, terwijl het tweede geval een voorbeeld is van simultane benade-

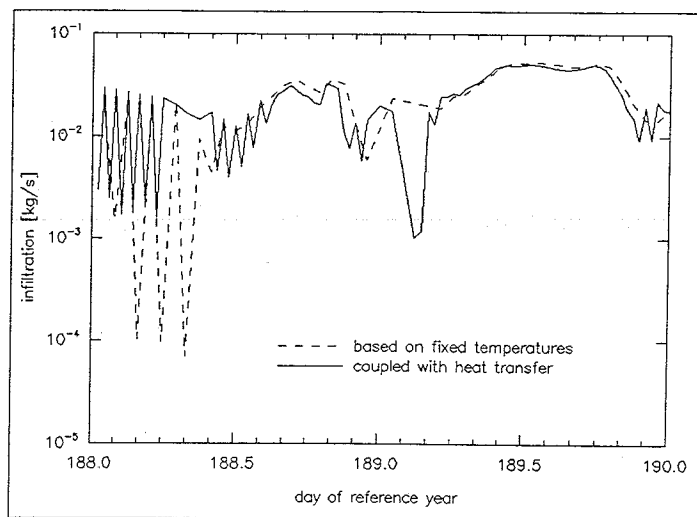


Fig. 5. Effect van gekoppeld c.q. ontkoppeld warmte- en massatransport op het voorspelde infiltratiedebiet voor 7 en 8 juli, uitgaande van gesloten ramen

ring van warmte- en massatransport. In beide gevallen is er hierbij vanuit gegaan dat de ramen steeds gesloten zouden zijn. De corresponderende binnentemperaturen zijn te zien in figuur 3. Figuur 5 geeft de simulatie resultaten voor wat betreft het infiltratiedebiet van de dagruimte. De verschillen spreken voor zich en tonen overduidelijk het belang van simulatie van gekoppeld warmte- en massatransport, met name voor problemen waarbij temperatuurverschillen een belangrijke rol spelen of sterk tijdafhankelijk zijn.

### 3.2. Voorbeeld 2: Binnenmilieu analyse van kantorencomplex

Het tweede voorbeeld betreft een beoordeling ten aanzien van behaaglijkheid en energiegebruik, van een (drie verdiepingen hoog) atrium in een nieuw kantoorgebouw. Voor deze studie was maar een beperkt budget en ook niet veel tijd beschikbaar. Daarom werd besloten om analyses uit te voeren voor drie karakteristieke segmenten van het gebouw in plaats van voor het totale complex als geheel. Ieder segment werd geabstraheerd tot een model, op basis van plattegronden en doorsneden. Voor wat betreft interne warmtelasten door apparatuur en bewoners, werd uitgegaan van ter beschikking gestelde rapporten en gesprekken met het kantoorpersoneel. De luchtstromingen worden in dit geval veroorzaakt door het zogenaamde schoorsteeneffect onder invloed van (asymmetrische) stralingswarmte en convectieve warmtetoevoer. De atria worden ook gebruikt als afvoerkanaal van ventilatielucht. Ieder atrium werd gemodelleerd als een aantal gestapelde, thermische zones bestaande uit een kern en een randgebied. Het massastroomnetwerk omvatte één of meer knooppunten per atriumzone en verbindingen met aangrenzende zones en buiten. De stromingselementen tussen de atriaknoppen werden benaderd als 'grote openingen'. De hierbij gebruikte relatie tussen drukverschil en stroming is de zogenaamde 'common orifice flow' vergelijking die uitgaat van ééndimensionale turbulente stroming. Dit is een zeer sterke vereenvoudiging van de werkelijkheid, die alleen de hoofdstroming door de atria kan benaderen. Uiteraard zou een zogenaamde CFD-benadering (numerieke stromingsleer) meer gedetailleerde resultaten opleveren, maar door daaraan verbonden prak-

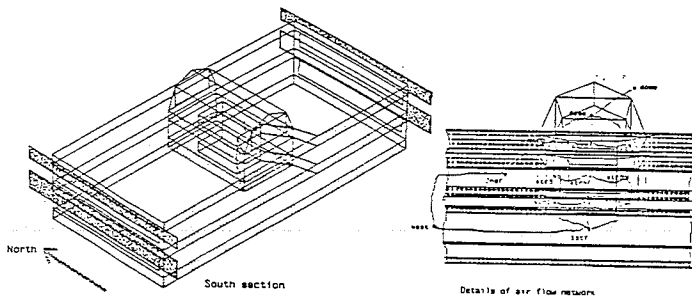


Fig. 6. Schematische weergave van een van de atria en het corresponderende gedeelte van het massastroomnetwerk

tische grenzen, zou een dergelijke benadering beperkt moeten blijven tot een enkel tijdstip en waarschijnlijk ook tot slechts één atrium. In dit voorbeeld waren we echter vooral geïnteresseerd in een langere simulatieperiode en in de interactie tussen de atria en de rest van het gebouw. Daarom werd hier gekozen voor de bovenvermelde netwerkmethod. Opge-merkt dient te worden dat in de nabije toekomst een onder-zoeksproject zal worden gestart, waarvan het de bedoeling is om de bovenvermelde praktische beperkingen te verminderen (Te Velde en Hensen 1991).

Figuur 6 geeft een schematische weergave van een van de atria en het corresponderende gedeelte van het massastroom net-werk. Op basis van dit model werden gekoppelde warmte- en massatransportsimulaties uitgevoerd voor een typische zon-  
dag/maandagperiode in de wintersituatie (dat wil zeggen opstart na het weekend) en voor een vrijdag in juli. Van de resultaten voor iedere tak van het netwerk is de volumestroom in  $m^3/s$  (bovenste getal) en de gemiddelde snelheid in  $m/s$  (onderste getal) aangegeven.

Als we beginnen met de resultaten voor de winter en 's mor-  
gens vroeg, zien we dat de debieten aan de linkerkant constant zijn (gelijk aan de toegevoerde hoeveelheid verse lucht). Ver-  
der naar rechts, corresponderen de vier knopen boven elkaar met de rand van het atrium, terwijl de tweede serie van vier knopen het centrum van het atrium voorstellen. De diagonaal  
bovenaan bevindt zich naast het glas van de atriumkoepel en de lucht stroomt daar naar beneden zoals te verwachten is. Deze stroming gaat verder naar beneden tot het midden van het atrium, waar de opwaartse stroming vanaf de eerste verdieping wordt ontmoet. Onderin het atrium is een cirkelvormige  
stroming in de richting van de klok, omdat de onverwarmde atriumlucht wordt gemengd met de toevoerlucht van de eerste verdieping.

De winterresultaten voor rond de middag, zijn voor wat betreft het linkse gedeelte van het diagram gelijk aan hiervoor. De stroming langs de rand van het atrium is nu echter naar boven met een sterk naar beneden gerichte component in het centrum van het atrium. De snelheden en debieten zijn vrij hoog en worden waarschijnlijk veroorzaakt door de lage temperatu-  
ren bovenin het atrium. Net als voor 's morgens vroeg is er een sterke menging (in de richting van de klok) tussen lucht van de eerste verdieping en uit het atrium. In dit geval omvat deze stroming echter bijna de halve hoogte van het atrium. Omdat er bij deze studie vanuit is gegaan dat alleen de ingeblazen  
verse lucht voor inductie zorgt en omdat de hoeveelheid verse

lucht werd bepaald op basis van het volume van de beschouwde sectie uit het gebouw, zullen de verse luchtdebieten in werkelijkheid hoger zijn en zal er waarschijnlijk een kleinere verticale temperatuurgradiënt ontstaan in het atrium. Uit de resultaten voor de wintersituatie blijkt dat koude lucht bovenin het atrium naar beneden wil stromen via het midden of langs de randen. Indien er maatregelen worden getroffen zodanig dat zich bovenin geen koude 'luchtbellen' kunnen vormen, is het mogelijk om de relatief sterke luchtstromingen ten gevolge van temperatuurverschillen te verminderen.

De resultaten voor 's morgens vroeg in de zomersituatie, ver-  
tonen een duidelijke stroming tegen de klok in over de volle-  
dige hoogte van het atrium. Omdat in dit geval de hogere snelheden in het midden van het atrium voorkomen, heeft dit vrijwel geen consequenties voor de thermische behaaglijk-  
heid. Rond de middag is de hoofdstroming 'verzwakt' tot een aantal kleinere cirkelvormige patronen in verschillende rich-  
tingen.

Uit analyse van de simulatieresultaten kwamen voor de atria lichtsnelheden en debieten naar voren die in de wintersituatie een orde groter waren dan in de aangrenzende gebouwzones. De consequenties hiervan voor verwarmingscapaciteit en behaaglijkheid beneden in de atria werden gedetailleerd onderzocht. Behalve de geconcludeerde noodzaak voor aan-  
vullende stralingsverwarming en voorbehandeling van de ven-  
tilatielucht, moeten de andere resultaten hier verder buiten beschouwing blijven gezien de beschikbare ruimte.

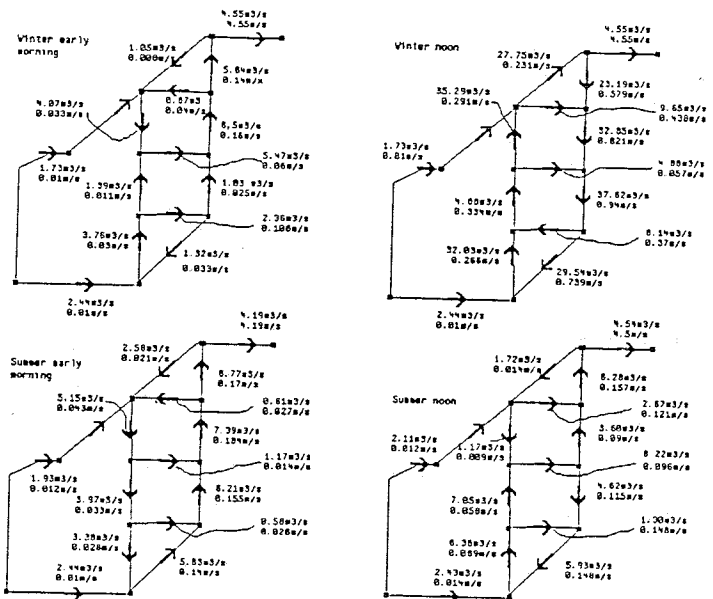


Fig. 7. Voorspelde waarden voor volumestroom en gemiddelde snelheid per tak van het luchtstroom netwerk, voor 's morgens vroeg en rond de middag in de winter- en zomersituatie

#### 4 Conclusies

Aan de hand van twee praktijkvoorbeelden is aangetoond hoe een massanetwerkbenadering geïntegreerd in een gebouw-  
simulatieprogramma kan worden gebruikt en wat ervan kan worden verwacht. De prestaties van het model geven aan dat het voortaan praktisch mogelijk is om warmte- en massatrans-

portproblemen in complexe gebouw- en installatieconfiguraties te beschouwen voor simulatieperioden in de orde van een jaar. Gesteld kan worden dat het model state-of-the-art is voor de netwerkbenadering van simulatie van gekoppeld warmte- en massatransport in gebouwen. Bij de ontwikkeling en het gebruik van het model is echter ook gebleken dat er op een aantal gebieden nog veel onderzoek nodig is. Hierbij kan worden gedacht aan ontwikkeling van meer typen stromingselementen (met name voor grote openingen), modellering van transport binnen een zone met vereenvoudigde methoden of door integratie van CFD technieken, uitbreiding van de winddrukcoëfficiënten database, uitbreiding van de gebouw en installatiecomponenten 'database', verbetering van de gebruiksvriendelijkheid en experimentele validatie en verificatie van de vereenvoudigingen en aannamen die moeten worden gehanteerd.

### Dankbetuiging

Bij dit werk is dankbaar gebruikgemaakt van eerder werk en de steun van professor J.A. Clarke van de Energy Simulation Research Unit aan de University of Strathclyde in Glasgow. Voor wat betreft gebruik van de praktijkvoorbeelden is dank verschuldigd aan J.W. Hand van hetzelfde instituut.

### Literatuur

1. Clarke, J.A., Energy simulation in building design, Adam Hilger Ltd, Bristol (UK), 1985.
2. Clarke, J.A. en J.L.M. Hensen 'An approach to the simulation of coupled heat and mass flow in buildings', Proc. 11th AIVC Conf. Ventilation System Performance te Bel-girate (I), 1990 IEA Air Infiltration and Ventilation Centre, Coventry (UK), Vol. 2, 1991, pp. 339-354.
3. Hand, J., 'Erskine Hospital Environmental Report' ESRU project report, University of Strathclyde, Energy Simulation Research Unit, Glasgow, 1990.
4. Hensen, J.L.M., 'On the thermal interaction of building structure and heating and ventilating system', dissertatie Technische Universiteit Eindhoven (FAGO), 1991.
5. Velde, K. Te. and J.L.M. Hensen, 'A hybrid network and flowfield method approach to simulation of air flow in rooms', Technische Universiteit Eindhoven, FAGO onderzoeksvoorstel, 1991.

## Meting van het rendement van wasemkappen

B. Geerinckx, P. Wouters, L. Vandaele

*Wetenschappelijk en Technisch Centrum voor het Bouwbedrijf*

### Samenvatting

Wasemkappen spelen een essentiële rol in de ventilatie van keukens. Dit artikel beschrijft de werkzaamheden van het WTCB met betrekking tot de bepaling van het rendement van wasemkappen [1].

Voorts wordt de band met de normalisatie op Europees vlak beschreven.

### 1 Inleiding

De hoofdfunctie van een wasemkap is de afzuiging van de kookdampen met als doel het verontreinigingsniveau in de keuken zo laag mogelijk te houden. Dit niveau wordt niet enkel bepaald door het afgezogen luchtdebiet, maar ook door de vorm en plaats van de wasemkap en door omringende factoren: bewegende personen, open deuren, enz.

De bepaling van het rendement van wasemkappen wordt momenteel besproken door het CEN (Comité Européen de Normalisation) in zijn werkgroep TC 156 WG 2, binnen het kader van de richtlijn van de Europese Raad inzake bouwproducten (december 1988). Het rendement van wasemkappen wordt in verband gebracht met de essentiële eisen inzake energie, hygiëne en gezondheid.

Aangezien er reeds twee meetmethoden bestaan (beschreven in de Franse norm NF E 51-704 [2] en de Zweedse norm SS 433 05 01 [3]), is het logisch dat deze methoden als vertrekpunt werden genomen.

Een gedetailleerde studie van de invloed van verscheidene parameters op de prestaties van wasemkappen werd in het verleden verricht door het CETIAT (F) [4].

### 2 Proefinstallatie

#### 2.1 Proefkamer

Gelet op de verschillen in voornoemde normen, is de informatie in dit artikel een beschrijving van de door het WTCB toegepaste methode.

Figuur 1 toont de proefkamer van het WTCB. Meer details worden gegeven in [1]. Een essentieel onderdeel van deze proefopstelling is het zogenaamde interferentiescherm (hoogte 1 m, breedte 0,5 m) dat bedoeld is om verstoringen, te wijten aan de bewoners, te simuleren. Dergelijk scherm is vereist volgens de Zweedse norm (niet door de Franse). Dit scherm wordt voor de kookopstelling heen en weer bewogen. In de proefkamer van het WTCB wordt dit scherm heen en