

# Vooronderzoek gevoeligheidsanalyse operatiekamer ventilatie

*Het doel van een ventilatiesysteem in een operatiekamer is om de operatiewond vrij te houden van bacteriën die zich door de lucht bewegen. Om dit te bereiken worden ziekenhuizen tegenwoordig uitgerust met een laminair downflow systeem. Gefilterde lucht wordt met lage snelheid door het plafond toegevoerd, zodat het rustig naar de patiënt kan zakken voordat het contaminatiebronnen passeert.*

**- door ing. W.A.C. Zoon\*, dr.ir. M.G.L.C. Loomans\*  
en prof.dr. ir. J.L.M. Hensen\***

**D**e prestatie van een ventilatiesysteem van een operatiekamer hangt af van vele factoren. Natuurlijk van het ontwerp van het systeem zelf, maar ook van ontwerpkeuzes die in de rest van de ruimte zijn gemaakt, en zelfs van de manier waarop de ruimte wordt gebruikt. Dit resulteert in een groot aantal ontwerpparameters die in de besluitvorming moet worden betrokken. Vanwege het grote aantal ontwerpparameters is het belangrijk om de relatieve belangrijkheid van deze parameters voor de prestatie in de ruimte te weten.

Weten welke ontwerpparameters er belangrijk zijn is de eerste stap naar een prestatiegebaseerd ontwerpproces. Dit geldt voor ontwerpparameters, zoals de afmetingen van het plenum, maar ook voor gebruikparameters, zoals de plaats van de instrumenttafels.

Belangrijke gebruikparameters vormen een set situaties waarmee de ontwerper rekening moet houden. Belangrijke ontwerpparameters vormen de keuzes waarbij de ontwerper zich bewust moet zijn van de consequenties voor de ventilatie-effectiviteit. Ontwerpkeuzes voor onbelangrij-

ke parameters kunnen worden genomen op basis van andere criteria, zoals gebruiksgemak of kosten.

Om te ontdekken welke parameters er van belang zijn, kan een gevoeligheidsanalyse worden uitgevoerd. Om de ventilatie-effectiviteit te bepalen wordt gebruik gemaakt van CFD-simulaties. Verschillende voorbeelden van toepassing van deze techniek voor operatiekamers kunnen in de literatuur worden teruggevonden. [1 en 2]

Bij het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse moet eerst worden bepaald welke techniek er zal worden toegepast. Er zullen hier twee technieken worden vergeleken, namelijk een Monte Carlo-variant en de methode van Morris. Het grootste verschil tussen beide methoden is dat bij Monte Carlo-analyse tussen twee simulaties alle parameters een andere waarde aannemen, terwijl bij de methode van Morris er tussen twee simulaties telkens slechts één parameter van waarde verandert.

Bij Monte Carlo-analyse zal een grotere variatie aan situaties worden geëvalueerd. De gevoeligheid zal dan ook



Ing. W.A.C. Zoon



Dr.ir. M.G.L.C. Loomans



Prof.dr. ir. J.L.M. Hensen

onder een groot aantal omstandigheden worden getoetst. Omdat de andere parameters tegelijkertijd veranderen is het minder duidelijk welke verande-

\* TU Eindhoven, Faculteit Bouwkunde

ringen aan welke parameter moeten worden toegekend. Als ook niet lineaire en tweede of hogere orde verbanden moeten worden aangetoond, zal het aantal simulaties dat moet worden gemaakt snel toenemen.

Bij Morris-analyse wordt slechts één parameter tegelijkertijd veranderd tussen twee opeenvolgende simulaties. Een verandering in de uitvoer kan zodoende direct worden teruggevoerd op de veranderde invoerparameter. Een voorbeeld van een studie waarbij de combinatie van Morris-analyse en CFD is toegepast is gepresenteerd door [3].

In dit artikel zal een onderzoek naar de minimum voorwaarden waaraan een gevoeligheidsanalyse van een ventilatiesysteem van een operatiekamer moet voldoen worden gepresenteerd. De gevoeligheidsanalyse zelf zal worden gebruikt om experimenten te ontwerpen.

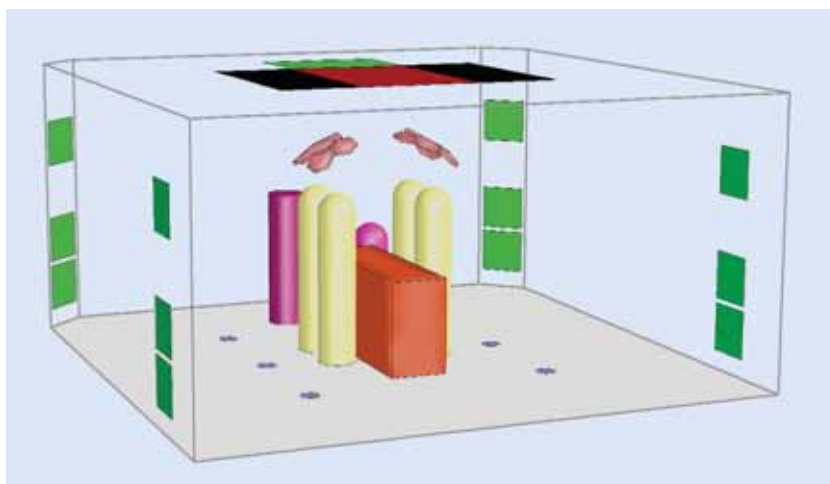
#### METHODE

Een van de benodigdheden van een goede gevoeligheidsanalyse is een kwantitatieve indicator voor de prestatie van het systeem. In dit onderzoek wordt de protectiefactor zoals gedefinieerd in de VDI 2167 (2007) gebruikt als indicator om de effectiviteit van de ventilatie te bepalen. Deeltjes worden op zes punten op de vloer rondom de operatietafel losgelaten. De Protectiefactor (PF) wordt bepaald door de concentratie van deeltjes in het operatiegebied vast te stellen. Berekening gebeurt met de volgende formule:

$$PF = -\log\left(\frac{C}{C_{ref}}\right) \quad (1)$$

C is de concentratie op de operatietafel,  $C_{ref}$  is de referentieconcentratie in een volledig gemixte ruimte. De Protectiefactor wordt bepaald op drie punten op de operatietafel, en op het midden van alle instrumenttafels.

In de VDI 2167 wordt ook een opstelling van verwarmde poppen beschreven die moet worden gebruikt bij het bepalen van de protectiefactor van een kamer. Deze opstelling is in dit onderzoek als basis gebruikt. De dimensies van de ruimte zijn vergelijkbaar met



Een voorbeeld van een van de onderzochte configuraties.

- FIGUUR 1 -

Ontwerpparameters	Gebruikspareters
Breedte plenum	Positie lamp langs de tafel
Breedte middenplenum	Afstand van de lamp tot de tafel
Lengte plenum	Hoek van de lamp met de normaal van de tafel
Aandeel luchtafvoer bovenhoeken	Aantal instrumenttafels links
Temperatuurverschil toevoerplenums	Aantal instrumenttafels rechts
Toevoersnelheid	Aantal instrumenttafels voeteneinde
Snelheidsverschil toevoerplenums	Vermogen randverlichting
Lengte Schort om plenum	Aantal mensen om de operatietafel
Vermogen steunverwarming	Vermogen apparatuur in de periferie
Lengte kamer	beweging in het operatiegebied
Hoogte kamer	Beweging in de periferie
Breedte kamer	
Keuze lamp	

Samenvatting van de ontwerp- en gebruikspareters van de gevoeligheidsanalyse.

- TABEL 1 -

die van een mock-up waarin eerder metingen zijn verricht. [4]. De inrichting van de ruimte, zowel wat het ventilatiesysteem als het gebruik van de ruimte betreft zijn onderdeel van de gevoeligheidsanalyse. De parameters hiervoor zijn vermeld in tabel 1. Een voorbeeldconfiguratie is afgebeeld in figuur 1.

#### GRIDONAFHANKELIJKHEIDSTUDIE

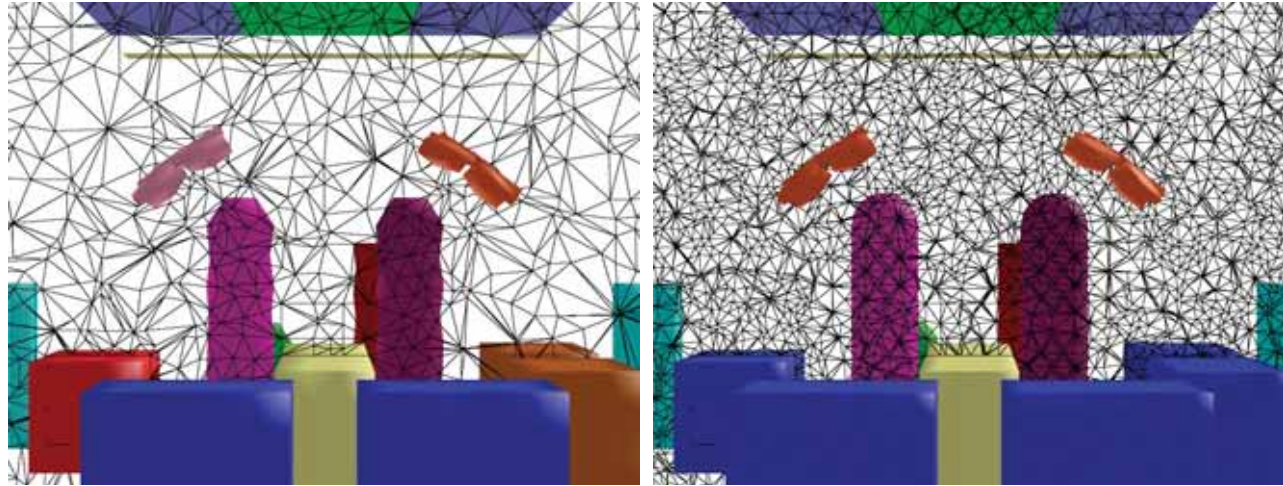
Voor zowel de Monte Carlo als de Morris-analyse is het aantal simulaties afhankelijk van het aantal parameters dat wordt onderzocht. Dit betekent dat, gezien het aantal parameters dat in tabel 1 wordt genoemd het genereren van de individuele simulaties moet worden geautomatiseerd. Het creëren van het grid is onderdeel van deze automatisering.

In de eerste stap is er gekozen voor een uniform grid met cellen van 30 cm. Dit is stap voor stap gereduceerd tot cellen van 10 centimeter. Voorbeelden zijn te vinden in figuur 2.

De convergentie van de individuele simulaties wordt beoordeeld door de hierboven gedefinieerde protectiefactor op verschillende punten te volgen. Voor de CFD-simulaties wordt gebruik gemaakt van het programma Fluent.

#### Methode gevoeligheidsanalyse

Om de methode te toetsen, is voor de operatiekamer een Monte Carlo analyse uitgevoerd, met een relatief grof grid en slechts zeven verschillende parameters. Het doel hiervan was om te evalueren of de methode bruikbare resultaten op kan leveren. Het alternatief, de methode van Morris, is hier



Voorbeelden van verschillende celgroottes (links: 0.20 m; rechts: 0.10 m).

- FIGUUR 2 -

Variabele	minimum	maximum
Breedte plenum [m]	2,8	3,6
Breedte centrale plenum [m]	0,8	1,4
Toevoersnelheid [m/s]	0,2	0,35
Temperatuurverschil toevoer [K]	0	2
Verwarmingsvermogen [W]	0	3.000
Lengte randafscherming [m]	0	1
Ventilatieafvoer in de bovenhoeken [%]	0	40

Variabelen gebruikt in de voorlopige Monte Carlo-analyse.

- TABEL 2 -

niet toegepast. In plaats daarvan zijn de resultaten vergeleken met die van [3], waarbij de Morris-methode is toegepast op CFD simulaties.

De onderzochte parameters zijn te vinden in tabel 2.

## RESULTATEN

In figuur 3 is de verticale tempera-

tuurgradiënt in de periferie van de ruimte voor verschillende afmetingen van het grid te zien. De gradiënt is halverwege het voeteneinde van de operatietafel en de achterwand van de ruimte gemaakt. Figuur 4 geeft de protectiefactor van de celgrootte weer.

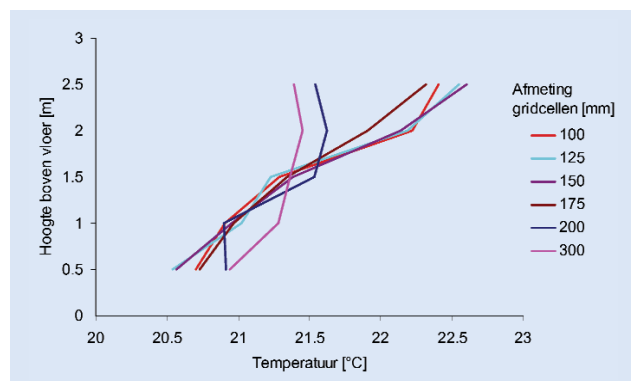
Resultaten van de voorlopige Monte Carlo-analyse met een grof grid zijn weergegeven in figuur 5. Hierin komt

duidelijk naar voren dat het temperatuurverschil tussen de inblaasplenum een belangrijke factor is. Figuur 6 geeft weer hoe de correlatiecoëfficiënten zich ontwikkelen met het aantal simulaties.

## DISCUSSIE

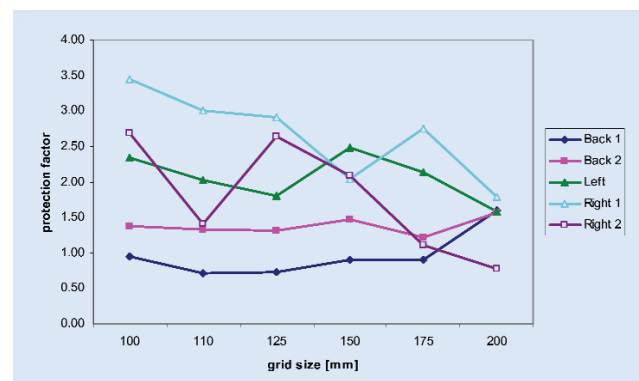
Als er van een uniform grid gebruik wordt gemaakt, blijft het automatisch genereren van simulatiebestanden voor gevoeligheidsanalyse ongecompliceerd, omdat de vraag of het grid op de juiste plaats verfijnd is niet ontstaat. De resultaten van de gridstudie laten echter zien dat, indien een uniform grid wordt gebruikt, de cellen significant kleiner moeten zijn dan 10 cm als de protectiefactor nauwkeurig moet worden uitgerekend. Dit komt onder andere door de grote gradiënten van die protectiefactor die rondom de instrumentafels op kunnen treden. In figuur 7 staat hiervan een voorbeeld.

Interessant is dat het berekenen van de temperatuurgradiënt met een relatief



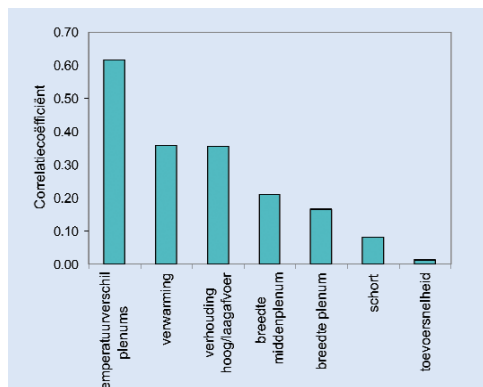
Verticale temperatuurgradiënt in de periferie van de kamer voor verschillende celgroottes.

- FIGUUR 3 -



Protectiefactor op de instrumentafels als functie van de celgrootte.

- FIGUUR 4 -

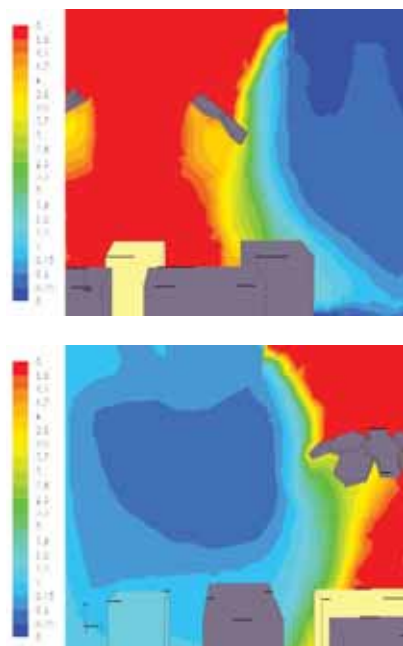


**Absolute waarde van de correlatiecoëfficiënt tussen de protectiefactor op de operatietafel en zeven verschillende ontwerpparameters.**

- FIGUUR 5 -

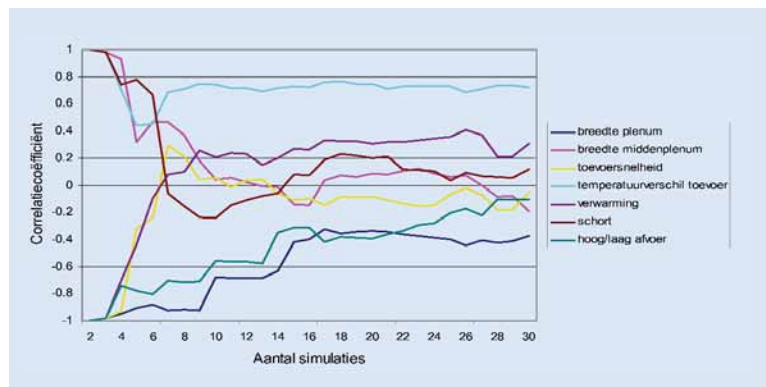
grof grid een redelijk resultaat geeft, terwijl dit voor de protectiefactor niet het geval is. Om de protectiefactor nauwkeurig te berekenen loont het om het grid lokaal te verfijnen. Waar dit moet gebeuren hangt af van de casus. Er zal dus een oplossing moeten worden gevonden als dit moet worden geautomatiseerd.

Als een minimale protectiefactor voor de instrumentafels van, bijvoorbeeld 1,5 gewenst is, is het wellicht mogelijk om toch met een grof grid te rekenen. Dit zou in lijn zijn met de "Coupling Decision Procedure Methodology" zoals beschreven door [5].



**Voorbeeld van een berekende protectiefactor voor een verticale doorsnede in de operatiekamer (links: instrumentafel aan de linkerzijde van de operatietafel; rechts: instrumentafel aan het voeteneinde van de operatietafel).**

- FIGUUR 7 -



**Ontwikkeling van de correlatiecoëfficiënt van de verschillende parameters in de Monte Carlo-analyse.**

- FIGUUR 6 -

Hoewel het grid in de simulaties te grof was om nauwkeurige resultaten te geven, gaf de Monte Carlo-analyse een duidelijke rangorde aan. Na 30 simulaties waren er nog enkele wisselingen in de rangorde, maar sommige parameters waren duidelijk belangrijker dan andere. Dit betekent dat voor het gebruik van een Monte Carlo-analyse 30 parameters volstaat. Voor een vergelijkbare Morris-analyse, ook met zeven parameters, moeten 32 simulaties worden verricht. [6]

### CONCLUSIES

De celgrootte om nauwkeurig de VDI 2167 protectiefactor te bepalen is significant kleiner dan 10 cm. Omdat het teveel rekentijd kost om veel simulaties met een dergelijk fijn grid uit te voeren, zal een grid moeten worden gebruikt dat lokaal verfijnd is.

De Monte Carlo-analyse geeft alleen informatie over de lineaire correlatie. Soms is dit voldoende, maar waarschijnlijk is dat hier niet het geval. Omdat er niet duidelijk op het aantal simulaties kan worden bespaard, zal in de uiteindelijke analyse van de methode van Morris gebruik worden gemaakt.

### DANKBETUIGING

Dit onderzoek wordt financieel ondersteund door de stichting PIT (Stichting Promotie Installatietechniek) en Deerns raadgevende ingenieurs.

### REFERENTIES

1. Brohus H., Balling K.D., Jeppesen D., 2006, *The effect of moving heat sources upon the stratification in rooms ventilated by displacement ventilation*. Indoor Air, Volume 16 issue 5, pp. 356-372.
2. Chow T.T., Yang X.Y., 2003, *Performance of ventilation system in a non-standard operating room, Building and environment*, Volume 38, Issue 12 p.p. 1401-1411.
3. Brohus H., Nielsen P, Petersen A, Sommerlund-Larsen K, 2007, *Sensitivity analysis of fire dynamics simulation*, Proceedings of Roomvent 2007.
4. Zoon W.A.C., v.d. Heijkant S.A.M., Hensen J.L.M., Loomans M.G.L.C., 2007, *Assessment of the performance of the airflow in an operating theatre*, Proceedings of Roomvent 2007.
5. Djunaedy, E. 2005. *External coupling between building energy simulation and computational fluid dynamics*, PhD thesis Technical university of Eindhoven.
6. Saltelli A., Tarantola S, Campolongo F, Ratto M. 2004, *Sensitivity analysis in practice*, John Wiley & Sons Inc., England.