

# De nieuwe behaaglijkheidsbalans voor de kwaliteit van de lucht in gebouwen

P. O. Fanger, D.Sc.\*



Prof. P. O. Fanger

vertaald door:  
ir. P. M. Bluysen

## Inleiding

DE BALANS HOUDT REKENING MET ALLE VERONTREINIGINGSBRONNEN IN EEN RUIMTE ZODAT EEN VENTILATIENIVEAU VERKREGEN WORDT DAT VOOR DE MENSSELIJKE WAARNEMING AANGENAAM IS.

Ventilatievoorschriften zijn al meer dan honderd jaar gebaseerd op Pettenkofer en Yaglou's theorie, dat in niet-industriële gebouwen de mens de belangrijkste verontreiniger is. In veel gebouwen kunnen helaas de serieuze klachten met betrekking tot de luchtkwaliteit niet worden voorkomen door de bestaande voorschriften.

Een nieuwe ventilatietheorie is geïntroduceerd, die behalve met roken en personen ook met alle andere verontreinigingsbronnen (materialen, meubilair, installaties, etc.) rekening houdt. De twee nieuwe eenheden voor de waarneming van de luchtkwaliteit, de olf en de decipol, maken dit mogelijk. De eenheden worden in een nieuwe behaaglijkheidsbalans voor de kwaliteit van de lucht in gebouwen gebruikt.

De behaaglijkheidsbalans schrijft de ventilatie voor die nodig is om een gegeven luchtkwaliteit (in decipol) in een ruimte met een gegeven verontreinigingsbelasting (in olfs) te bereiken. De balans schrijft verder voor dat er of meer ventilatie dan volgens de huidige voorschriften moet worden toegepast, of een vermindering van de verborgen olfs, die de lucht in veel bestaande gebouwen bederven. De behaaglijkheidsbalans is een rationele basis voor het opstellen van toekomstige ventilatievoorschriften.

## Samenvatting

In Klimaatbeheersing februari 1988 introduceerden wij de nieuwe eenheden 'olf' en 'decipol' van prof. Fanger, als maat voor luchtverontreiniging.

In dit artikel wordt een nieuwe ventilatietheorie geïntroduceerd die gekwantificeerd wordt door de nieuwe behaaglijkheidsbalans voor de binnenluchtkwaliteit, gebaseerd op die nieuwe eenheden.

Deze balans schrijft meer ventilatie voor dan de huidige voorschriften.

## Summary

The new comfort equation for indoor air quality

In the 1988 February issue of Klimaatbeheersing, we introduced the new units 'olf' or 'decipol' from prof. Fanger as measurements of air pollution.

In this article a new ventilation theory is introduced which is quantified by the new indoor air quality comfort balance based on these new units.

This balance requires more ventilation air than for the present regulations.

## Luchtkwaliteit

De kwaliteit van de lucht in gebouwen is vaak onaangenaam. Veel mensen worden geïrriteerd door de lucht die ze inademen en voelen zich prettiger wanneer ze naar buiten gaan. Vele praktijkstudies in kantoren, scholen, woonhuizen en andere niet-industriële gebouwen in Europa, Noord-Amerika en Japan, hebben deze ontevredenheid met de luchtkwaliteit aangetoond. De klachten bestaan uit gewaarwording van muffe en benauwende lucht, irritatie van het slijmvlies, hoofdpijn, lethargie, etc. Soms worden deze klachten 'the sick building syndrome' genoemd (WHO 1983).

De klachten zijn niet specifiek voor bepaalde gebouwen, doch komen in de meeste ruimten voor. Er bestaat echter een brede spreiding in het percentage van geïrriteerde aanwezigen. In sommige gebouwen zijn de oorzaken voor de slechte luchtkwaliteit duidelijk. De toegevoerde lucht kan bijvoorbeeld minder zijn dan oorspronkelijk was ontworpen. Maar het frustrerende feit is dat de meeste gebouwen, bestudeerd in ver-

schillende delen van de wereld, voldoen aan de bestaande ventilatievoorschriften, en dat de concentraties van de gemeten stoffen verscheidene malen lager zijn dan enig denkbare grens. Desalniettemin, vinden typisch 20, 40 of 60 procent van de aanwezigen de lucht onaanvaardbaar.

## Ventilatievoorschrift: nieuw!

Het doel van een ventilatievoorschrift is het ervoor zorgen dat de kwaliteit van de lucht aanvaardbaar is voor de aanwezigen. Als dit niet wordt bereikt, is er iets mis met de bestaande voorschriften. De theorie van Pettenkofer (1885), de grondlegger van de moderne hygiëne, en de klassieke studies van Yaglou e.a. (1936), zijn nog steeds de basis voor de bestaande voorschriften. Hun experimenten met bioemissies van mensen hebben een fundamentele invloed gehad op de ventilatievoorschriften van deze eeuw. Er werd als vanzelfsprekend verondersteld dat de mens de belangrijkste of enige verontreiniger was in kantoorgebouwen, publieke gebouwen en andere, soortgelijke, niet-industriële ruimten. De benodigde ventilatie werd daarom gespecificeerd per aanwezige.

\* Laboratory of Heating and Air Conditioning, Technical University of Denmark, Denmark.

In sommige recente voorschriften wordt gewezen op andere verontreinigingsbronnen of op enkele verontreinigende deeltjes. Maar voor het gebruik van die voorschriften in de praktijk, wordt nog steeds aangenomen dat de ruimten en het ventilatiesysteem volkomen schoon zijn en niet bijdragen tot de verontreiniging van de lucht.

Fanger e.a. (1988) hebben in een recente studie van bewoonde en lege kantoorgebouwen, ernstige verontreinigingsbronnen in ruimten en ventilatiesystemen aangetoond. De introductie van de olf eenheid (Fanger 1988) maakte het vergelijken van verschillende soorten verontreinigingsbronnen mogelijk. Het bleek dat de emissie van de mens gemiddeld niet meer dan 13 procent van de totale verontreiniging bedraagt. De materialen in de ruimten en ventilatiesystemen, sinds meer dan een eeuw genegeerd door de voorschriften, waren de voornaamste oorzaak voor de gevonden, slechte luchtkwaliteit in de 15 bestudeerde kantoorgebouwen. Verondersteld wordt dat deze verborgen olfs, de voornaamste reden voor het sick building syndrome zijn.

#### De olf en de decipol

In dit artikel wordt een nieuwe ventilatietheorie geïntroduceerd, die alle verontreinigingsbronnen in aanmerking neemt. Deze theorie wordt door een nieuwe behaaglijkheidsbalans voor de kwaliteit van de lucht in gebouwen gekwantificeerd. De balans is gebaseerd op de *olf* en de *decipol*, de twee nieuwe eenheden die de luchtverontreiniging op dezelfde manier optellen als de menselijke waarneming dat doet (Fanger 1988). Het idee is dat alle verontreinigingen worden uitgedrukt in olfs. Dit

#### COMFORT EQUATION FOR INDOOR AIR QUALITY

$$Q = 10 \frac{G}{C_i - G_o}$$

$$C_i = 112 (\ln(PD) - 5,98)^{-4}$$

where  $Q$  = ventilation rate (l/s)

$G$  = total pollution sources (olf)

$C_i$  = perceived indoor air quality (decipol)

$C_o$  = perceived outdoor air quality (decipol)

$PD$  = percent dissatisfied (%)

Fig. 2 De behaaglijkheidsbalans voor de kwaliteit van de lucht in gebouwen

maakt het mogelijk om voor de totale verontreiniging in een ruimte de benodigde ventilatie ten behoeve van de gewenste luchtkwaliteit te bepalen.

#### Nieuwe behaaglijkheidsbalans

Het gebruik van de olf en decipol eenheden maakt het mogelijk om een verontreinigingsbalans voor een ruimte te bepalen (zie figuur 1). Uit de volgende vergelijking blijkt dat de verontreiniging in de ruimte wordt opgenomen door de toegevoerde buitenlucht.

$$C_i = C_o + 10G/Q \quad (1)$$

waarin:

$C_i$  = waargenomen kwaliteit van de lucht in de ruimte (decipol);

$C_o$  = waargenomen kwaliteit van de buitenlucht (decipol);

$G$  = verontreinigingsbronsterkte in de ruimte en het corresponderende ventilatiesysteem;

$Q$  = toegevoerde buitenlucht = ventilatiehoeveelheid (l/s).

Vanwege het ontwerp is het meestal de benodigde ventilatiehoeveelheid die bepaald moet worden. Vergelijking (1) is daarom omschreven in figuur 2. Ver-

der is ook de relatie tussen de binnenluchtkwaliteit in decipol en het percentage ontevredenen in figuur 2 te zien (Fanger 1988).

Het model in figuur 2 vormt de nieuwe behaaglijkheidsbalans voor de binnenluchtkwaliteit. De behaaglijkheidsbalans bepaalt de benodigde ventilatie voor elk gevraagde waargenomen luchtkwaliteit (d.i. percentage ontevredenen). De waargenomen kwaliteit van de buitenlucht is tevens opgenomen in het model en zal moeten worden geschat om de benodigde ventilatie te bepalen. Wanneer de verontreinigingsbronsterkte en de ventilatiehoeveelheid bekend zijn dan kan de behaaglijkheidsbalans tevens gebruikt worden om de luchtkwaliteit in een ruimte te voorspellen (in decipol of in percentage ontevredenen). De behaaglijkheidsbalans kan daarnaast worden gebruikt om, door middel van het meten van de toegevoerde buitenlucht en door middel van een beoordeling van de luchtkwaliteit binnen en buiten door een panel, experimenteel de bronsterkte in olfs te bepalen (Fanger e.a. 1988).

De behaaglijkheidsbalans geldt voor niet-veranderende situaties en volledige mixing van de ruimtelucht. Een overeenkomstige balans voor veranderende situaties met een bepaald ventilatierendement kan gemakkelijk worden opgezet.

Een basisidee in de ventilatievoorschriften sinds Pettenkofer en Yaglou was, dat de waarneming van de luchtkwaliteit door mensen vanaf het eerste moment dat ze een ruimte binnenkomen aangenaam moet zijn. Het was belangrijk dat de eerste indruk van de lucht goed was. Tegen de mensen zeggen dat ze de eerste negatieve indruk van de luchtkwaliteit moeten negeren en in plaats daarvan een tijdje moeten wachten totdat ze gewend zijn aan de verontreiniging, is onrealistisch.

De huidige behaaglijkheidsbalans, die gebaseerd is op de beoordeling van de luchtkwaliteit onmiddellijk na het betreden van de ruimte, houdt het idee van de eerste indruk in ere. Het is belangrijk op te merken dat de behaaglijkheidsbalans voorspelt hoe de waarneming van de lucht zal zijn. Sommige verontreinigende stoffen, zoals radon en koolmonoxyde, kunnen niet worden waargenomen maar kunnen wel een gezondheidsrisico veroorzaken. Zulke verontreinigende stoffen moeten afzonderlijk worden beschouwd.

#### Toekomstige ventilatievoorschriften

De behaaglijkheidsbalans voor de bin-

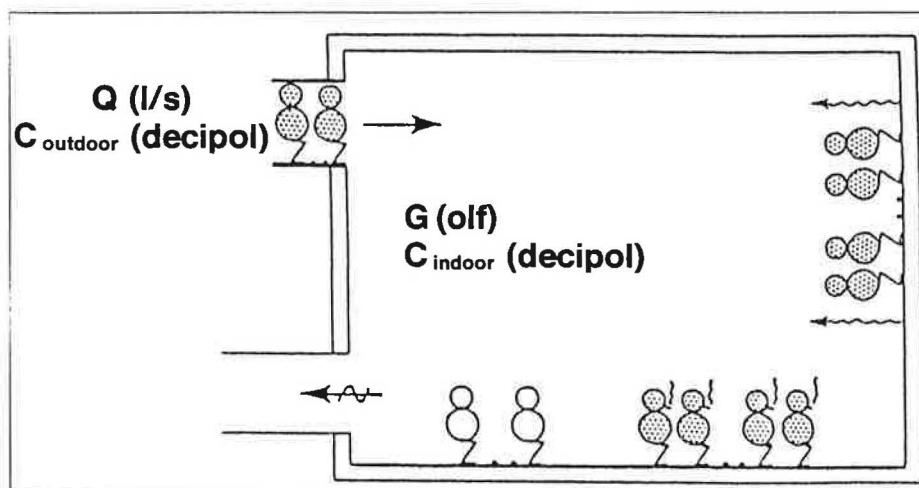


Fig. 1 Een ruimte met een totale verontreiniging  $G$  en een waarneming van de luchtkwaliteit  $C_i$ , geventileerd met buitenlucht met een luchtkwaliteit  $C_o$ .

nenluchtkwaliteit kan worden gebruikt als een rationele basis voor toekomstige ventilatievoorschriften. Het houdt voor de eerste keer rekening met alle verontreinigingsbronnen, en niet alleen met de emissie en het roken van de mens. Het kwantificeert voor de eerste keer de luchtkwaliteit binnen en buiten zoals het door de mens wordt waargenomen.

*De eerste stap.* De eerste stap in een ventilatievoorschrift is het bepalen van de gewenste luchtkwaliteit in de te ventileren ruimte. Dit is reeds gedaan in het ventilatievoorschrift 62-1989 van ASHRAE (ASHRAE 1989), dat specificiert dat de luchtkwaliteit aanvaardbaar moet zijn voor 80 procent van de aanwezigen. Dit komt overeen met 20 procent ontevreden of met 1,4 decipol. Maar een toekomstig voorschrift kan voor ruimten met verschillende functies, verschillende luchtkwaliteiten voorschrijven.

	decipol
tijdens smog episodes	> 1
in steden met matige verontreiniging (Fanger e.a. 1988)	0,05-0,3
op een berg of aan zee	0,01

**Tabel 1 Waarneming van buitenluchtkwaliteit**

*De tweede stap.* Het schatten van de kwaliteit van de beschikbare buitenlucht voor de ventilatie van de ruimte, is de volgende stap. De waargenomen buitenluchtverontreiniging is in veel gevallen verwaarloosbaar vergeleken met het niveau binnen. Enige gemeten en geschatte ordes van grootte van de waargenomen kwaliteit van de buitenlucht zijn opgesomd in tabel 1. De lijst kan voor verschillende soorten locaties en verschillende hoogten boven de grond uitgebreid worden. Als de buitenluchtverontreiniging serieus is, kan reiniging van de buitenlucht nodig zijn voordat het bruikbaar is voor ventilatie.

*De derde stap.* In de derde stap is een schatting van alle verontreinigingsbronnen in de ruimte en het bijbehorende ventilatiesysteem vereist. De totale olf-belasting in de ruimte moet berekend worden.

Als voorbeeld, geeft tabel 2 schattingen voor de olfbelastingen per vierkante meter vloeroppervlak in kantoorgebouwen weer. De bijdrage van bioemissies van de aanwezige personen is duidelijk (d.i., 1 olf per persoon volgens de olf definitie). Met 0,1 persoon per vierkante meter, draagt de emissie van personen

Verontreinigingsbronnen		olf/m <sup>2</sup>
Aanwezige personen (1 persoon per 10 m <sup>2</sup> )		
bioemissie van personen		0,1
bijkomende belasting door	20% rokers	0,1
	40% rokers	0,2
	60% rokers	0,3
Materialen en ventilatiesysteem		
gemiddeld in bestaande gebouwen		0,4
lage olf gebouw		0,1
Totale belasting in kantoorgebouwen		
gemiddelde in bestaande gebouwen, 40% rokers		0,7
lage olf gebouwen		0,2

**Tabel 2 Geschatte olfbelastingen in kantoorgebouwen per vierkante meter vloeroppervlak**

0,1 olf per vierkante meter vloeroppervlak bij. Er bestaat een extra bijdrage, gebaseerd op studies uitgevoerd door Cain e.a. (1983), wanneer roken is toegestaan. Voor 40 procent rokers, een typisch getal in Europa, komt dit overeen met een extra 0,2 olf per vierkante meter. In Noord-Amerika rookt minder dan 30 procent van de aanwezige personen, maar elke roker gebruikt meer sigaretten. De gemiddelde bronsterkte met betrekking tot roken in Noord-Amerika is daarom eveneens ongeveer 0,2 olf per vierkante meter.

De geschatte verontreinigingsbelastingen veroorzaakt door materialen en ventilatiesystemen zijn gebaseerd op een veldstudie van Fanger e.a. (1988) in 15 at random gekozen kantoorgebouwen in Kopenhagen, Denemarken. De onderzoekers vonden omvangrijke verontreinigingsbronnen in de lege gebouwen. De gemiddelde verontreinigingsbelasting bedroeg 0,4 olf per vierkante meter met een spreiding van 0,1 tot 0,9 olf per vierkante meter. De verontreiniging werd veroorzaakt door allerlei soorten materialen, meubilair, tapijten, boeken, kantoorapparatuur, etc., en een belangrijke bijdrage kwam van de ventilatiesystemen. Er is voorgesteld om als eerste benadering voor de verontreiniging veroorzaakt door materialen en ventilatiesystemen in bestaande kantoorgebouwen, de waarde 0,4 olf per vierkante meter te nemen.

Voor het ontwerpen van kantoorgebouwen in de toekomst, is strikte controle van de gebruikte materialen aan te raden. Nieuwe ventilatiesystemen met een lage olfwaarde moeten ontworpen worden, en een streng schoonmaak-schema om die olfwaarde laag te houden moet worden voorgeschreven. Uit een schatting blijkt dat lage olf kantoorgebouwen gebouwd kunnen worden met een verontreinigingsbelasting van ongeveer 0,1 olf per vierkante meter, veroorzaakt door materialen en ventilatiesystemen. Dit komt overeen met de beste gebouwen in de Kopenhagenstudie. Er wordt aangeraden om meer veldstudies uit te voeren naar olfwaardes aan een breed spectrum van lege, bestaande en toekomstige gebouwen in verschillende delen van de wereld. De huidige schattingen van de verontreinigingsbelasting, in olf per vierkante meter, komen overeen met de globale schattingen van warmte- en koelingsbelastingen in gebouwen, uitgedrukt in Watt per vierkante meter. Een meer gedetailleerde berekening van de warmtebelasting vereist informatie aangaande de isolatie van de verschillende bouwonderdelen. Op dezelfde wijze heeft men voor een meer gedetailleerde berekening van verontreinigingsbronnen in een ruimte, informatie nodig over de olfwaarden van de afzonderlijke materialen in ruimten en van de componenten van het ventilatiesysteem. Hoewel

Behaaglijkheidsbalans (binnenluchtkwaliteit = 1,4 decipol)	L/(s.m <sup>2</sup> )
bestaande gebouwen (0,7 olf/m <sup>2</sup> ) roken	5
lage olf gebouwen (0,2 olf/m <sup>2</sup> )	1,4
ASHRAE Standaard 62-89 (ASHRAE 1989)	0,8
Noorse richtlijnen, NKB (NKB 1981)	
roken	1,0
niet-roken	0,4
DIN 1946 Standaard, grote kantoorgebouwen (DIN 1983)	
roken	1,9
niet-roken	1,4
* aanname: 0,1 persoon/m <sup>2</sup> en verwaarloosbare buitenluchtverontreiniging	

**Tabel 3 Ventilatievoorschriften voor kantoorgebouwen\***

deze informatie nog niet bestaat, is deze in de toekomst van belang voor het ontwerpen en selecteren van materialen.

In tabel 2 is tevens een schatting van de totale verontreinigingsbelasting in kantoorgebouwen weergegeven. Voor een gemiddelde van bestaande kantoorgebouwen met 40 procent rokers, is de totale verontreinigingsbelasting als gevolg van aanwezige personen, roken, materialen en ventilatiesystemen, 0,7 of per vierkante meter. In lage olf kantoorgebouwen zonder rokers, is de totale verontreinigingsbelasting slechts 0,2 olf per vierkante meter. Ventilatievoorschriften voor kantoorgebouwen kunnen nu met behulp van de nieuwe behaaglijkheidsbalans bepaald worden. Om een binnenluchtkwaliteit van 1,4 decipol (20 procent ontevredenen) in een gemiddeld, bestaand kantoorgebouw te verkrijgen, is een ventilatie hoeveelheid van 5 l/s per vierkante meter nodig (tabel 3). Dit is drie maal zoveel als voorgeschreven door ieder bestaand ventilatievoorschrift (tabel 3). Zulk een toename in ventilatie is niet aan te raden, maar het is beter om de overbodige verborgen olfs te reduceren, een voor de hand liggend alternatief. Het reduceren van de verborgen olfs zal de binnenluchtkwaliteit verbeteren en tegelijkertijd de benodigde ventilatiehoeveelheid en het energieverbruik verlagen, en bovendien het tocht-risico verkleinen.

Het ventilatievoorschrift in lage olf gebouwen is 1,4 l/s per vierkante meter (tabel 3). Deze ventilatiehoeveelheid ligt in de zelfde orde van grootte als sommige voorgeschreven waarden. De sleutel tot het verkrijgen van een aanvaardbare binnenluchtkwaliteit met een redelijke ventilatiehoeveelheid, is het op een laag niveau houden van de olfbelasting in het gebouw. Het ontwerpen, de ontwikkeling en het onderhoud van lage olfgebouwen is een interessante uitdaging voor de toekomst. Het is een voor de hand liggende manier om de binnenluchtkwaliteit te verbeteren en een veelbelovende methode om 'sick buildings' te voorkomen.

### Conclusies

Een nieuwe ventilatietheorie is geïntroduceerd. De theorie is gekwantificeerd door de nieuwe behaaglijkheidsbalans voor de binnenluchtkwaliteit, gebaseerd op de twee nieuwe eenheden olf en decipol.

De behaaglijkheidsbalans schrijft de ventilatie voor die nodig is om een gewenste waarneming van de luchtkwali-

teit (in decipol) in een ruimte met een gegeven verontreinigingsbelasting (in olf) te verkrijgen.

De behaaglijkheidsbalans houdt voor de eerste keer rekening met alle verontreinigingsbronnen, en niet alleen met de emissies en het roken van de aanwezige personen; de balans kwantificeert voor de eerste keer de binnen- en buitenluchtkwaliteit zoals het door de mensen wordt ervaren.

De balans schrijft meer ventilatie voor dan de huidige voorschriften, of een reductie van de verborgen olfs, die de luchtkwaliteit in vele bestaande gebouwen bederven.

De behaaglijkheidsbalans vormt een rationele basis voor toekomstige ventilatievoorschriften.

### Over de auteur

P.O. Fanger, D.Sc., Fellow ASHRAE, is professor aan de Technische Universiteit van Denemarken, laboratorium voor verwarming- en airconditioning.

Hij is tevens president van de Scandinavische Federatie van Verwarming, Sanitair en Airconditioning Ingenieurs (SCANVAC). In 1978 was hij president van de eerste internationale Indoor Air conferentie en in 1985, was hij president van het eerste HVAC wereldcongres, CLIMA 2000.

### References

- ASHRAE 1989. ASHRAE Standard 62.89, 'Ventilation for acceptable indoor air quality.' Atlanta: American Society of Heating, Refrigerating and Airconditioning Engineers Inc.
- Cain, W.S., Leaderer, B.P., Isseroff, R., Berglund, L.G., Huey, R.J., Lipsitt, E.D., Perlman, D., 1983. 'Ventilation requirements in buildings: control of occupancy odor and tobacco smoke odor.' Atmos. Environ. Vol. 17, No. 6.
- DIN. 1983. 1946 Teil 2: Raumluftechnik gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Luftungsregeln). Berlin: Deutsche Institut for Normung.
- Fanger, P.O., 1988. 'Introduction of the olf- and the decipol-unit to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors.' Energy and Buildings, Vol. 12, pp. 1-6, KB-2, 1988.
- Fanger, P.O., Lauridsen, J., Bluysen, P., Clausen, G., 1988, 'Air pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit.' Energy and Buildings, Vol. 12, pp. 7-19, KB-2, 1988.
- NKB. 1981. Report No. 41: Indoor Climate. Stockholm.
- Pettenkofer, M.S., 1858. 'Uber den Luftwechsel in Wohngebäuden.' Munich: Cotta'sche Buchhandlung.
- WHO. 1983. 'Indoor air pollutants: exposure and health effects.' EURO Reports and Studies 78, pp. 23-26.
- Yaglou, C.P., Riley, E.C., Coggins, D.I., 'Ventilation requirements.' ASH&VE Transactions, Vol. 42, pp. 133-162.