3241

HEALTHY BUILDINGS '88

En komfortekvation för inneluftkvalitet

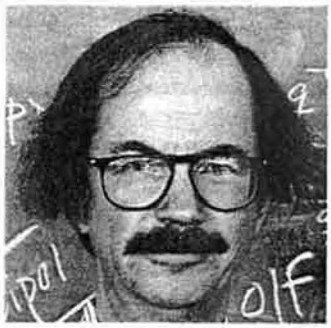
För att kunna uppleva en viss önskad luftkvalitet i ett rum där man vistas är tillflödet av uteluft mycket viktigt. Nu finns det en speciell ekvation som bestämmer detta nödvändiga uteluftflöde.

Inneluftens kvalitet är ofta oacceptabel. Många människor besväras av den luft de inandas och känner en lättnad när de kommer ut i det fria. Dessa besvär har dokumenterats i hundratals detaljerade fältstudier i kontor, skolor, bostäder och andra icke industriella byggnader i Europa, Nordamerika och Japan (1–11). Klagomålen omfattar att luften upplevs som tung och instängd, som irritation av slemhinnor och irritation som leder till huvudvärk och trötthet. Dessa symtom kallas för sjuka hus syndromet (sick building syndromes) (12).

Besvären förekommer inte bara i några få speciella byggnader. De uppträder i de flesta byggnader, men med stora skillnader när det gäller hur stor andel av människorna i huset som drabbas av besvären.

I några byggnader är orsaken till den dåliga luftkvaliteten uppenbar, t ex när ventilationen är betydligt lägre än den projekterade. Men den frusterande upptäckten är att i de flesta av de undersökta byggnaderna var ventilationen tillräcklig. Den gällande ventilationstandarden var uppfylld. Trots detta var 20,40 eller 60 % av de människor som vistades i byggnaderna besvärade av dålig luft.

Ändamålet med en ventilationsstandard är att uppnå en inneluft som upplevs som acceptabel av det stora flertalet människor som vistas i lokalen. Om detta inte uppnås måste det vara något fel med standarden. Grunden för de ventilationsstandarder som tillämpas runt om i världen är fortfarande de studier som genomfördes under förra seklet av tysken Pettenkoffer, grundläggaren av den moderna hygienen (13). Vidare har Yaglou's klassiska experiment på Harvard under 30-talet (14) haft stort inflytande på de ventilationsteorier som tillämpas idag. Pettenkofer och Yaglou kvantifierade föroreningen från människor.

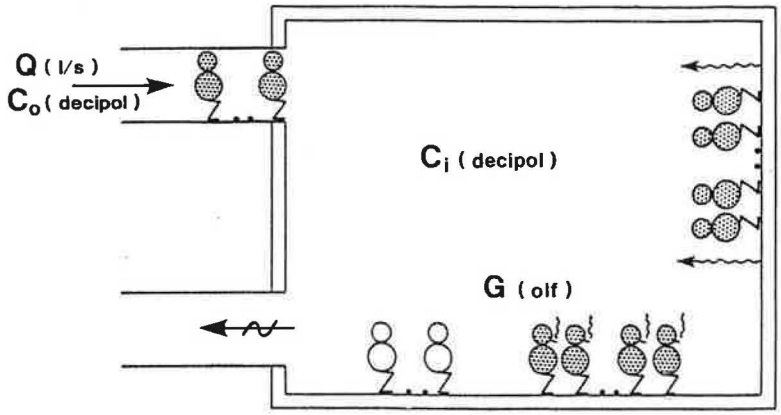


Professor P.O. Fanger laboratoriet for Varme- og klimateknik, Danmarks Tekniske Højskole.

I kontor, samlingslokaler och liknande icke-industriella rum har det hittills normalt förutsatts att människan var den dominerande föroreningskällan. Ventilationsbehovet har därför angivits som funktion av antalet människor i rummet. Standarderna har också utgått ifrån att såväl rum som ventilationssystem har varit helt rena och inte bidragit till att förorena luften.

Nya danska studier (15) har emellertid genom att man undersökt kontorsbyggnader där inga människor vistades visat att såväl rum som ventilationssystem kan utgöra betydande föroreningskällor. Introduktionen av olf-enheten (16,17) har gjort det möjligt att såväl kvantifiera som jämföra olika föroreningskällor. Det visade sig att i genomsnitt 13 % av samtliga föroreningskällor i ett rum utgjordes av föroreningar orsakade av människor. Materialen i rummet och ventilationssystemet som ventilationsstandarderna hittills icke betraktat som föroreningskällor utgjorde en väsentlig anledning till den relativt dåliga luftkvaliteten som observerades i de 15 undersökta kontorsbyggnaderna. Dessa dolda olf antas vara orsaken till många klagomål.

I denna artikel presenteras en komfortekvation för inneluftkvalitet. Den innefattar *alla* förekommande föroreningskällor inte



Figur 1. Ett rum med föroreningskällor och totalt G (olf) och med en upplevd luftkvalitet om C_i (decipol), ventilerat med ett uteluftsflöde om q (l/s) med luftkvaliteten C_0 (decipol).

bara föroreningar från människor. Ekvationen är baserad på de nya enheterna olf och decipol och tar hänsyn till alla föroreningskomponenter i luften på samma sätt som de upplevs av människor (16,17).

Idén är att uttrycka alla föroreningskällor i olf. För en total föroreningsbelastning (i olf) i ett rum är det därför möjligt att beräkna den ventilation som är nödvändig för att uppnå en önskad upplevd luftkvalitet (i decipol).

Komfortekvation för inneluftkvalitet

Användningen av olf-och decipolenheterna gör det möjligt att beskriva samtliga föroreningskällor i ett rum *(figur 1)*. Följande ekvation uttrycker att föroreningar som avges av föroreningskällor i ett rum (inkl ventilationssystemet) tas upp av den tillförda uteluften:

$$C_i = C_0 + 10\frac{G}{Q}$$

C_i= upplevd luftkvalitet i rummet (decipol)
C_o=upplevd luftkvalitet utomhus (decipol)
G = den totala föroreningskällstyrkan i rummet och ventilationssystemet (olf)
Q = tillfört uteluftflöde (l/s)

Vid projekteringen är det som regel tilluftsflödet som ska bestämmas varför ekvationen lämpligen omformas med hänsyn till detta. Inneluftens kvalitet kan också uttryckas som andelen missnöjda av de som vistas i lokalen, PD. Komfortekvationens nya utformning framgår av *figur 2.*

Komfortekvationen ger det tilluftsflöde som är nödvändigt med hänsyn till de föroreningskällor som finns i rummet.

Uteluftens upplevda förorening inkluderas i modellen och måste först bestämmas för att det ska gå att bestämma den nödvändiga uteluftstillförseln.

Komfortekvationen kan också användas till att förutsäga luftkvaliteten i ett rum (decipol) när källstyrkan och tilluftsflödet är kända. Komfortekvationen kan dessutom användas till att bestämma källstyrkan i olf experimentellt genom att mäta uteluftstillförseln och bedöma inneluftens kvalitet med hjälp av en panel (9).

Komfortekvationen gäller för stationära förhållanden och fullständig omblandning av luften i rummet. Ett motsvarande samband som gäller för instationära förhållanden och med ett bestämt tilluftsflöde kan relativt enkelt tas fram.

En grundläggande princip för ventilationsstandard ända sedan Pettenkoffer (13) och Yaglou (14) har varit att folk ska uppleva att luften är acceptabel från första ögonblicket de kommer in i rummet. Det är viktigt att det första intrycket av luften är bra. Det vore orealistiskt att säga till folk att de inte ska bekymra sig för det första negativa intrycket av luften när de kommer in i ett rum utan bara vänta en stund tills de vant sig vid föroreningen och luften känns mer acceptabel. Komfortekvationen följer den gamla principen om det första intrycket och ekvationen baseras därför på bedömning av luftkvaliteten omedelbart efter att man kommer in i rummet.

Framtida ventilationsstandarder

Komfortekvationen för luftkvalitet kan användas som en rationell grund för framtida ventilationsstandarder. Den tar hänsyn för första gången till alla föroreningskällor inte bara föroreningar från människor och rökning och den kvantifierar för första gången kvaliteten på inne- och uteluften såsom den upplevs av människor.

Det första steget i en ventilationsstandard är att fastställa den luftkvalitet som önskas i ett speciellt rum. Det görs t ex i den existerande ASHRAE Standard (18) som förutsäger att luften skall vara acceptabel för minst 80 % av de människor som vistas i rummet. Detta motsvarar 20 % missnöjda eller 1,4 decipol. En framtida

Figur 2. Den nya komfortekvationen för inneluftkvalitet.

KOMFORTLIGNING FOR INDELUFTKVALITET

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

$$C_i = 112(\ln(PD) - 5.98)^{-4}$$

hvor
Q = tilført udeluftstrøm (l/s)
G = forureningskilder, ialt (olf)
C_i = oplevet luftkvalitet inde (decipol)
C_o = oplevet luftkvalitet ude (decipol)
PD = procent utilfredse (%)

ventilationsstandard skulle mycket väl kunna specificera olika luftkvaliteter för rum med olika användningsområden.

Nästa steg är att klarlägga kvaliteten på den uteluft som finns tillgänglig för ventilation av rummet. I många fall är föroreningen ute försumbar i förhållande till inomhus. Det gäller som regel i Skandinavien. I *tabell 1* anges några uppmätta och skattade värden på den upplevda uteluft-

Tabell 1. Upplevd luftkvalitet

	decipol
Vid smog	1
I städer med måttliga luftföroreningar	0,05–0,3
I orörd natur eller ute på havet	0,01

kvaliteten. Ytterligare data bör dock insamlas för olika typer av byggnader och vid olika geografiska förhållanden. Om föroreningarna utomhus är svåra kan det i princip bli nödvändigt att rena luften innan den är lämplig att tillföras byggnaden via ventilationssystemet.

Det tredje steget kräver att alla föroreningskällor i rummet inklusive ventilationssystemet klarläggs, d v s den totala olf-belastningen skall beräknas. I *tabell 2* visas exempel på konstaterade olf-belastningar per kvadratmeter golvarea i kontor. En del härav är det bidrag till föroreningen som kommer från de människor som vistas i lokalen. Detta bidrag är i enlighet med definitionen för olf (16,17), 1 olf per person.

Med personbelastningen 0,1 människa per kvadratmeter golvarea bidrar människor till föroreningar i rummet med 0,1 olf per kvadratmeter golvarea. Om rökning tillåts tillkommer denna ytterligare förorening som kan uppskattas med hjälp av Cain's studier (19). Med en andel rökare av 40 %, vilket är typiskt för europeiska förhållanden bidrar rökningen med belastningen 0,2 olf per kvadratmeter golvarea.

Uppskattningen av den förorening som kommer från material i rummet och från ventilationssystemet baseras på de tidigare nämnda fältundersökningarna i 15 slumpvis utvalda kontorsbyggnader i Köpenhamn (15). Vid dessa undersökningar fann man omfattande dolda föroreningskällor genom att undersöka byggnaderna när inga människor vistades i dem. Den genomsnittliga föroreningsbelastningen var 0,4 olf per kvadratmeter golvarea, men det var stora variationer från byggnad till byggnad. Variationen låg i intervallet 0,1 till 0,9 olf per kvadratmeter golvarea.

Föroreningarna härstammade från många olika typer av byggnadsmaterial såsom inventarier, möbler, papper, kontorsmaskiner och ett väsentligt bidrag härrörde i många tillfällen från ventilationssystemet.

Föroreningskälla	olf/m²
Personer (en person per 10 m²)	
Förorening från människor	0,1
Tillkommande belastning från 20 % rökare	0,1
40 % "	0,2
60 % "	0,3
Material och ventilationssystem	
Genomsnitt i befintliga byggnader	0,4
Låg-olf-byggnader	0,1
Total belastning i befintliga kontorsbyggnader	
Genomsnitt i befintliga byggnader, 40 % rökare	0,7
Låg-olf-byggnader, inga rökare	0,2

Tabell 2. Olf-belastning i kontor per kvadratmeter golvarea

	l/s m²
Komfortekvation (inneluftkvalitet = 1,4 decipol)	
Befintliga byggnader (0,7 olf/m³) rökning	5
Låg-olf-byggnader (0,2 olf/m²) inte rökning	1,4
ASHRAE Standard (62–81) (18)	
Rökning	1,7
Inte rökning	0,25
Nordiska kommittén för byggnadsbestämmelser, NKB (20)	
Rökning	1,9
Inte rökning	1,4

*Tabell 3. Ventilationsbehov i kontorsbyggnader**

** Vid en personalbelastning om 0,1 personer/m² golvarea och en försumbar uteluftsförorening.*

Som en första grov uppskattning kan föroreningen från material och ventilationssystem i existerande kontorsbyggnader sättas till genomsnittligt 0,4 olf per kvadratmeter golvarea.

När man i framtiden ska projektera ventilationsinstallationer i kontor är det viktigt att noga kontrollera att såväl använda material som inventarier är låg-olf-material, d v s material som avger låga mängder föroreningar. Vidare bör ventilationssystemet väljas så, att det bidrar med ett lågt olf-värde när det är nytt och det är viktigt att upprätta instruktioner för såväl rengöring som drift och skötsel av installationen så att olf-värdet kan hållas lågt under hela installationens brukstid.

På detta sätt kan låg-olf-kontor projekteras med en föroreningsbelastning från material och ventilationssystem på omkring 0,1 olf per kvadratmeter golvarea. Detta motsvarar de lägsta värdena som upptäcktes vid undersökningen i Köpenhamn (15). Det är dock angeläget att det görs ytterligare ett stort antal fältstudier i såväl existerande som nya låg-olf-byggnader.

Här redovisade överslagsmässiga värden på föroreningsbelastningen uttryckt i olf per kvadratmeter golvarea kan jämföras med riktvärden för värme- eller kylbelastningen i ett rum uttryckt i W/m². En mer detaljerad analys av den termiska belastningen kräver bl a kännedom om k-värden för varje enskild byggnadsdel.

På samma sätt kräver en mera detaljerad analys av föroreningskällor i ett rum kännedom om olf/m² för vart och ett av de använda materialen. En olf-katalog för olika typiska material finns inte ännu, men kommer i framtiden att vara ett verksamt

hjälpmedel vid projektering och vid val av lågförorenande material.

Tabell 2 innehåller en uppskattning av den totala föroreningsbelastningen i kontor. Den har tagits fram genom att addera olf-värdena för de enskilda föroreningskällorna (personer, rökning, material). För en existerande genomsnittlig kontorsbyggnad där 40 % av människorna röker är den totala belastningen från personer, rökning, material och ventilationssystem 0,7 olf/m^2 golvarea. I låg-olf-kontor där rökning inte förekommer är den totala belastningen bara 0,2 olf/m^2 golvarea.

Ventilationsbehovet för kontorsbyggnader kan nu bestämmas med den nya komfortekvationen. För att uppnå en inneluftkvalitet på 1,4 decipol (20 % missnöjda) krävs ett tilluftsflöde av 5 l/s, m^2 golvarea i ett genomsnittligt befintligt kontorshus (*tabell 3)*. Detta är flera gånger högre än existerande ventilationsstandarder föreskriver såsom minsta godtagna värde *(tabell 3)*.

En sådan ökning av ventilationen rekommenderas inte. Däremot rekommenderas det självklara alternativet, nämligen att reducera den onödiga olfbelastningen. Detta kommer samtidigt att förbättra inneluftens kvalitet, minska ventilationsbehovet och energiförbrukningen samt reducera risken för drag.

I låg-olf-byggnader blir ventilationsbehovet enligt komfortekvationen omkring 1,4 l/s, m^2 golvarea (*tabell 3*). Detta värde är av samma storleksordning eller högre än det som idag föreskrivs som minimum i existerande standarder. Det är emellertid lägre än den genomsnittliga ventilationen på 2 l/s, m^2 golvarea som mättes upp i 15 befintliga kontorsbyggnader i Köpenhamn (18).

Nyckeln till att uppnå en acceptabel inneluftkvalitet med en rimlig ventilation är givetvis att hålla olf-belastningen i byggnaderna på en så låg nivå som möjligt. Projektering, utveckling och underhåll av låg-olf-byggnader är en fascinerande arbetsuppgift i framtiden. Det är en självklar metod att förbättra inneluftkvaliteten och att skapa större tillfredsställelse hos de människor som vistas i byggnaden.

Slutsatser

- En komfortekvation för inneluftens kvalitet har tagits fram baserad på de nya enheterna olf och decipol.
- Komfortekvationen anger den ventilation som är nödvändig för att uppnå en given upplevd luftkvalitet (i decipol) i ett rum med en given föroreningsbelastning (i olf).
- Komfortekvationen omfattar för första gången alla föroreningskällor, inte bara människor och eventuellt tobaksrökning, och den kvantifierar kvaliteten på inne- och uteluften som den upplevs av människor.
- Ekvationen föreskriver mer ventilation än nuvarande standarder eller en reduktion av de dolda olf som finns i många existerande byggnader.
- Komfortekvationen utgör en rationell grund för framtida ventilationsstandarder.

Referenser

(1) I. Andersen and GR Lundqvist: Indoor climate in schools. Danish Building Research Institute, Copenhagen, 1966. 100 p.

(2) B Berglund, I. Johansson and T. Lindvall: A longitudinal study of air contaminants in a newly built preschool. Environement International, 8, 1982, pp. 111–115.

(3) T.D. Sterling, E. Sterling and H.D. Dimich-Ward: Air quality in public buildings with health related complaints, ASHRAE Trans, 89, 2A, 1983, pp. 198.

(4) J. Melius, K. Wallinford, R. Keenlyside and J. Carpenter: Indoor air quality – the NOISH experience. Ann. Am. Governm. Ind. Hyg. Vol. 10, 1984, pp. 3–7.

(5) M.J. Finnegan, C.A.C. Pickering and P.S. Burge: The sick building syndrome: prevalence studies. Brit, Med. J., 289, 1984, pp. 1573–1575.

(6) J.A.J Stolwijk: The sick building syndrome. In B. Berglund, T. Lindvall and J. Sundell (Eds,): Indoor Air. Vol. 1. Swedish Council for Building Reseach, Stockholm, 1984, pp 23–29.

(7) P. Kröling: Gesundheits- und Befindenstörung in klimatisierten Gebäuden. W. Zuckschwerdt Verlag. München, 1985.

(8) A.S. Robertson, P.S. Burge, A. Hedge, J. Simms, F.S. Gill, M. Finnegan, C.A.C. Pickering and G. Dalton: Comparison of health problems related to work and environmental measurements in two office buildings with different ventilation systems. Brit. Med. J., 291, 1985, pp. 373–376.

(9) O. Valbjorn and P. Skov: Influence of indoor climate on the sick building syndrome prevalence. In B. Seifert et al (Eds.): Indoor Air '87, Berlin, Vol. 2, 1987, pp. 593–597.

(10) H. Komine. S. Yoshizawa and Y. Tochihara: The investigation on IAQ and subjective evaluations of occupants for indoor environments in Japanese office buildings. In B. Seifert et al. (Eds.): Indoor Air '87, Berlin, Vol. 3, 1987, pp.123–128.

(11) S. Wilson and H. Hedge: The office environment survey. A study of building sickness. Building Use Studies Ltd. London, 1987.

(12) WHO, Indoor air pollutants: exposure and health effects. EURO Reports and Studies 78, 1983, pp. 23–26.

(13) M.V. Pettenkofer: Über den Luftwechsel in Wohngebäuden. München 1858.

(14) C.P. Yaglou, E.C. Riley, and D.I. Coggins: Ventilation requirements. ASHVE Transactions, Vol. 42. 1936, pp 133–162.

(15) P.O. Fanger, J. Lauridsen, P. Bluyssen and G. Clausen: Air Pollution sources in offices and assembly halls, quantified by the olf unit. Energy and Buildings, Vol, 12, 1988, pp.7–19.

(16) P.O. Fanger: Introduction of the olf- and the decipol-unit to quantify air pollution perceived by humans indoors and outdoors. Energy and Buildings, Vol. 12, 1988, pp. 1–6.

(17) P.O Fanger: Olf og decipol- de nye enheder for oplevet luftkvalitet. Dansk VVS, nr. 2. 1988, pp. 6–8.

(18) Standard 62–81: Ventilation for acceptable indoor air quality. ASHRAE, Atlanta, 1981.

(19) W.S. Cain, B.P. Leaderer, R. Isseroff, L.G. Berlund, R.J. Huey, E.D.Lipsitt and D. Perlman: Ventilation requirements in buildings: Control of occupancy odor and tobacco smoke odor. Atmos. Environ. Vol. 17, No. 6, 1983.

(20) NKB-rapport nr 41: Inomhusklimat. Stockholm, 1981.

(21) DIN 1946 Teil 2: Raumlufttechnik Gesundheitstechnische Anforderungen (VDI-Lüftungsregeln). Deutsches Institut för Normung (DIN), Berlin, 1983.