

# ‘Excellent’ binnenluchtkwaliteit in commerciële kantoorgebouwen

*Dit artikel rapporteert een praktijkonderzoek naar de controle van RSP in een kantooromgeving. De resultaten zijn direct toepasbaar in de installatietechniek bij het ontwerpen van ventilatiesystemen in een klimaatbehandelingsinstallatie. Praktijkobservaties geven aan dat de RSP in een kantooromgeving zou kunnen worden onderdrukt tot minder dan  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  binnen één uur. Dit kan worden gerealiseerd door gelijktijdige filtratie van de buitenlucht en van de retourlucht. Buitenluchtfiltratie heeft een grote invloed op de stationaire concentratie RSP binnen en de effectieve zuivering van de lucht wordt gerealiseerd door het filteren van de retourlucht. Er wordt verondersteld dat de resultaten van dit onderzoek zouden kunnen worden doorgetrokken naar het zuiveren van de lucht van andere binnenluchtverontreinigingen zoals vluchtige organische samenstellingen.*

*- door K.S. Lam\*, F.S. Chan\*, W.Y. Fung\*, B.S.S. Lui\*\*,  
L.W.L. Lau\*\**

## NOMENCLATURE

$Q_f$  Ventilatie-debiet van de buitenlucht  
 $Q_{if}$  Infiltratie-debiet van de buitenlucht  
 $Q_v$  Ventilatie-debiet van de retourlucht  
 $N_f$  RSP filter efficiëntie van de buitenluchtfilters  
 $N_{if}$  RSP doordringingscoëfficiënt  
 $N_v$  RSP filter efficiëntie van de retourluchtfilters  
 $C_t$  RSP concentratie binnen op tijdstip  $t$   
 $C_{out}$  RSP concentratie buiten  
 $C_\infty$  Stationaire RSP concentratie binnen  
 $C_0$  RSP concentratie binnen bij de start van het experiment (tijdstip  $t=0$ )  
 $V$  Effectief volume van de ruimte  
 $S$  RSP bron in de ruimte

$K$  Verliescoëfficiënt door afzetting op het oppervlak en kanaalverlies  
 $R$  Effectieve zuivering  
 $\Psi$  Kosten per 1 % systeemefficiëntie

## INTRODUCTIE

Mensen besteden meer dan 70 % van hun tijd binnen [12]. Een goede binnenluchtkwaliteit kan het comfortniveau van gebruikers verbeteren, de productiviteit verhogen en de gezondheid van werknemers verbeteren. Een belangeloos certificatie schema van de binnenluchtkwaliteit (IAQ Certification Scheme) is geïntroduceerd voor kantoren en publieke plaatsen door het

Environmental Protection Department, HSKAR in 1999 [4]. Dit schema is officieel gelanceerd in 2004 [5]. Gecertificeerde gebouwen zijn gegroepeerd in twee klassen volgens de 12 IAQ (Indoor Air Quality) parameters. Wanneer de binnenluchtkwaliteit (IAQ) beter is dan de ‘excellente’ IAQ-doelstelling, dan wordt het gebouw geclassificeerd als ‘excellent’. Als de binnenluchtkwaliteit slechter is dan de IAQ doelstelling ‘goed’, dan wordt het gebouw niet geclassificeerd. Voor IAQ-waarden die tussen deze twee klassen in liggen wordt het gebouw geclassificeerd als ‘goed’. De twaalf parameters bevatten fysieke, chemische, biologische en radioactieve parameters. Dit zijn ruimtetemperatuur, relatieve luchtvochtigheid, lichtsnelheid, koolstofdioxide, koolstofmonoxide, inadembare stofdeeltjes (RSP), stikstofdioxide, ozon, formaldehyde, totale vluchtige organische samenstellingen (Total Volatile Organic Compounds TVOC), luchtbacteriën en radon. IAQ-certificaten worden toegekend door het IAQ Information Centre, elk certificaat is één jaar geldig. In het begin van 2005 zijn respectievelijk 7 en 67 gebouwen in

\* Department of Civil and Structural Engineering, The Hong Kong Polytechnic University, Hung Hom, Kowloon, Hong Kong.

\*\*Hysan Development Company Limited, Manulife Plaza, Hysan Avenue, Causeway Bay, Hong Kong  
Vertaling van “Achieving ‘excellent’ indoor air quality in commercial offices equipped with air-handling unit – respirable suspended particulate”, door L. Schellen BSc, afstudeerster bij de unit Building Physics & Systems van de TU Eindhoven.

Hong Kong geclassificeerd als 'excellent' en 'goed'.

Er is gebleken dat, om de IAQ-doelstelling 'excellente' te verkrijgen, TVOC en RSP twee bepalende parameters zijn. VOC omvat benzeen, toluen, xyleen, formaldehyde, tetrachloormethaan, trichloorethyleen, perchloorethyleen, chloroform, 1,2(1,3)-dichloorbenzeen, 1,4-dichloorbenzeen en ethylbenzeen. RSP refereert naar deeltjes in de lucht met een nominale aërodynamische diameter van 10  $\mu\text{m}$  of kleiner. RSP is een synoniem voor  $\text{PM}_{10}$ . Vele onderzoeken [11; 12 en 17] geven aan dat het RSP en TVOC-niveau in veel gebouwen in Hong Kong niet voldoen aan de IAQ-doelstelling van de 'excellent' klasse. Om de 'excellent' klasse te verkrijgen zijn er waarschijnlijk nieuwe ventilatieontwerpen benodigd voor het verwijderen van RSP en TVOC. Andere parameters waren of geen probleem, of ze konden worden beheerd door een goed management of onderhoud.

Controle van RSP in binnenomgevingen is gedurende vele jaren onderzocht. Offermann, et al [15] onderzochten de beheersing van RSP door mobiele luchtreinigers. [8] en [10] onderzochten het effect van filtratie en ventilatie met de buitenlucht op de binnenconcentratie door middel van modellen. Jamriska, et al [7] onderzochten het effect van ventilatiesystemen en filtratie op submicrometerdeeltjes in een kantoorgebouw in Brisbane, Australië. Dit onderzoek was gebaseerd op submicrondeeltjes grootte en niet op  $\text{PM}_{10}$ . Reed, et al [16] onderzochten in een bewoond huis in de stad Reston, United States, het effect van ventilatiesystemen en luchtfilters op de vervalsnelheid van deeltjes van verontreinigingsbronnen binnenshuis. Enkele onderzoeken [9] waren gebaseerd op het aantal deeltjes en niet op de massa van de deeltjes. Sommige onderzoeken betroffen woongebouwen en geen kantoorgebouwen. Ondanks dat alle eerdere onderzoeken een onschatbare kennis verschaffen in de controle van binnenluchtdeeltjes, is er verder onderzoek benodigd naar de toepassing in de praktijk.

Het doel van dit onderzoek was om de uitvoerbaarheid van het realiseren van lage RSP-waarden te onderzoeken in commerciële kantoorgebouwen, zonder dat er een grote aanpassingen nodig zijn aan de bestaande mecha-

sche ventilatiesystemen (verwarming, ventilatie en airconditioning (HVAC)). Het concept was het verbeteren van het efficiënt verwijderen van de deeltjes door het bestaande ventilatiesysteem, en tevens bepalen of de RSP-doelstelling 'excellente' kan worden bereikt. Belangrijker is dat de comfortniveaus in een ruimte niet in gevaar mogen worden gebracht. De RSP-doelstelling is samengesteld uit twee delen. Het eerste deel bestaat uit het concentratieniveau en het tweede deel bestaat uit de tijd. De RSP-doelstelling is om een RSP-niveau te realiseren, gemiddeld over acht uur, beneden  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Het eerste doel van dit onderzoek is om te observeren of een HVAC-systeem een RSP-niveau beneden de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zou kunnen realiseren. Het tweede doel is om te verzekeren dat de zuiveringsnelheid snel genoeg is om ervoor te zorgen dat de RSP beneden dit niveau komt voor 9.00 uur. Als het zuiveren te lang duurt, dan zal de acht uurlijks gemiddelde waarde van het RSP-concentratieniveau boven de  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  uitstijgen.

In het algemeen bestaan de HVAC-systemen in Hong Kong uit twee typen. Het ene systeem is het centrale luchtbehandelingsysteem waarbij één grote luchtbehandelingkast de airconditioning regelt van een hele grote ruimte. Dit systeem kan zowel zijn gebaseerd op een variabele luchthoeveelheid (VAV) als op een constante luchthoeveelheid (CAV). Het andere systeem is het centrale verwarmingssysteem waarbij elke ruimte wordt geregeld door één of meerdere warmte-afgifte apparaten. Omdat het inpassen van hogere efficiëntie filters in een bestaand centraal verwarmingssysteem bijna onmogelijk is, richt dit onderzoek zich alleen op luchtbehandelingsystemen.

## PRAKTIJKONDERZOEK

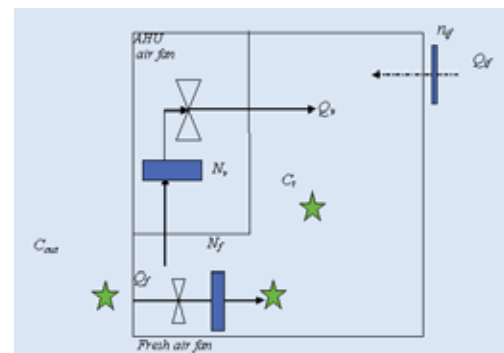
### Experimenteel

Dit onderzoek werd tussen maart 2002 en juli 2002 verricht in een commercieel gebouw in Causeway Bay. Causeway Bay is gesitueerd aan de noordelijke kust van Hong Kong Island. Het is een belangrijk amusementsgebied met veel commerciële gebouwen en woonappartementen. Het gebouw heeft 40 verdiepingen en wordt omgeven door veel andere hoogbouw. De noordzijde

van het gebouw ligt aan een brede weg met zes rijstroken met een grote verkeersstroom. De buitenconcentratie RSP werd gedomineerd door de emissies van het verkeer. Andere emissiebronnen waren onder andere afzuigen van keukens, dit gebied bevat namelijk een groot aantal restaurants. Er was een meetstation dicht bij het gebouw aanwezig die de lucht aan de kant van de weg monitorde. De gemiddelde jaarlijkse concentratie RSP aan de kant van de weg was ongeveer  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Een kantoorruimte op de benedenverdieping die niet in gebruik was, werd gereserveerd voor het uitvoeren van het experiment. De complete zone werd ontruimd, zodat de ruimte één grote ruimte vormde zonder obstakels. De zone besloeg een vloeroppervlak van  $525 \text{ m}^2$  ( $25 \times 21 \times 2,85 \text{ m}$ ).

### Apparatuur

Figuur 1 geeft de ventilatiezone en de aanwezige apparatuur weer. De luchtbehandelingkast bestond uit een centrifugaal ventilator (3 kW). Het ontworpen ventilatiedebiet van de ventilator (genoteerd als  $Q_v$ ) was  $3,5 \text{ m}^3/\text{s}$  bij een statische druk van 3 Pa. De toevoer van buitenlucht in het gebouw was gecentraliseerd. Eén ventilator distribueerde buitenlucht naar meer dan tien verdiepingen. Voor volledige controle van de hoeveelheid toegevoerde buitenlucht werd de originele buitenluchtoevoer geïsoleerd en afgedicht. Een tijdelijke centrifugaalventilator (1,5 kW) werd geïnstalleerd in de testzone, deze trok direct buitenlucht aan van één van de ramen van de testruimte. Het ontworpen ventilatiedebiet (genoteerd als  $Q_p$ ) van deze ventilator was  $0,5 \text{ m}^3/\text{s}$  bij een statische druk van 2 Pa. Om het ventilatievoud van de buitenluchtventilator te controleren werd een omvormer [Siemens PLC, Manches-



Schematisch diagram van de ventilatiezone en de apparatuuropstelling.

- FIGUUR 1-

ter, UK] geïnstalleerd. Een Sosomec multimeter [model DIRIS M, Socomec, Cedex, Frankrijk] werd gebruikt om het energiegebruik van de ventilatoren te monitoren bij verschillende ventilatiedebieten.

Een luchtsnelheidsmeter van het merk TSI VelociCalc [model 8386, TSI Inc., Shoreview, MN, USA] werd gebruikt. Het ventilatiedebiet van de retourlucht en van de buitenlucht werd verkregen door respectievelijk het meten van de toevoerlucht over de dwarsdoorsnede van het kanaal van de luchtbehandelingkast en in het kanaal van de toevoerlucht van de buitenluchtventilator [1]. Het ventilatiedebiet werd gecontroleerd door de vlaksnelheden te meten bij het filtercompartiment (retourlucht). De nauwkeurigheid van de gebruikte anemometer was  $\pm 3\%$ , ofwel 0,015 m/s. De tracergasmethode werd gebruikt voor het meten van het ventilatievoud, in navolging van de ASTM standaard testmethode [2]. Als tracergas werd sulfur hexafluoride ( $\text{SF}_6$ ) gebruikt. Een Bruel & Kjaer fotoakoestische multi-gas monitor werd gebruikt voor de analyse. De nauwkeurigheid van de  $\text{SF}_6$  meting was  $\pm 5$  ppb. De ventilatievoudmeting werd voor verschillende doeleinden gebruikt in dit experiment. Als eerste werd het gebruikt om het ventilatiedebiet van de buitenlucht te valideren, dat werd verkregen uit luchtsnelheidsmetingen. Ten tweede werd het gebruikt om het effectieve volume van de ruimte van de ventilatiezone te evalueren. Ten derde kon hieruit wor-

den vastgesteld of de buitenlucht en de retourlucht wel of niet werden gemengd. Ten slotte werd het gebruikt om de luchtdichtheid van de ventilatiezone te evalueren. Infiltratie van buitenlucht ( $Q_{if}$ ) door ongecontroleerde wegen is onvermijdelijk in dit experiment. De exacte hoeveelheid RSP dat binnendringt door de gebouwschil ( $Q_{ifinit}$ ) kan niet worden gemeten, deze zal zich mengen met de binnenconcentratie. Als de ventilatiezone in een luchtbehandelingsysteem is ontworpen om een kleine overdruk te hebben, dan representeert de gemeten achtergrond  $Q_{if}$  als  $Q_v$  en  $Q_f$  nul zijn, de maximaal mogelijke  $Q_{if}$ . De bovenste limiet van de fout die wordt veroorzaakt door infiltratie kan worden geschat door gebruikmaking van deze technologie. Drie TSI DustTrak (model 8520) RSP stofmonitoren werden opgesteld. De eerste hield toezicht op de buitenconcentratie RSP, de tweede stond opgesteld in het midden van de ruimte en hield toezicht op de binnenconcentratie RSP. De laatste werd nabij het vlak van de buitenluchtfiler geplaatst om de filtratie efficiëntie van de verschillende filters te monitoren. De stofmonitoren stelden de  $\text{PM}_{10}$  vast met een interval van 1 minuut bij een ventilatiedebiet van 1,7 l/m. Een Taper Element Oscillating Microbalance real time gravimetrische analyzer werd op de locatie opgesteld. De data van alle drie de DustTraks werden aangepast met gebruikmaking van de TEOM als referentie.

## Filters

Vier typen filters werden gebruikt. Deze bestonden uit: geplooide filters (pre-filters en filter cartridges), niet-ondersteunde pocket filters (zakkenfilters) en HEPA-filters. Zakkenfilters werden vanwege de geringe ruimte alleen getest in de buitenluchtventilator en niet in de luchtbehandelingkast. De grootte en het ontworpen ventilatiedebiet van alle filters was respectievelijk 0,61x0,61 m en 3.400 m<sup>3</sup>/h. Tabel 1 geeft de specificaties weer van de filters die werden gebruikt. De afname van de stationaire concentratie RSP van de filters bij verschillende ventilatiedebieten werd gemeten door zowel de VelociCalc als de hellende manometer.

## Het experiment

Het experiment werd uitgevoerd om de evenwichtsconcentratie RSP binnen ( $C_{\infty}$ ) en de tijd die benodigd is om  $C_{\infty}$  te bereiken bij verschillende filtratie-efficiënties te observeren. Een experiment dient te starten met een voldoende hoog concentratieniveau RSP binnen. Dit werd bereikt door het ventilatiesysteem uit te schakelen en buitenlucht de zone te laten instromen. Wanneer de concentratie RSP binnen het niveau van de concentratie RSP van de buitenlucht bereikt had, dan werden de ramen gesloten. Deze beginconcentratie RSP werd genoteerd als  $C_0$ . Vervolgens werd de buitenluchtventilator van de luchtbehandelingkast ingeschakeld. Het verval van het binnen-niveau RSP werd gemonitord totdat

Model	Filter type	Rated efficiency* (%)	Initial pressure drop (Pa)	Cost per filter (HK\$) year 2002
AM-Air 1100, 2''	Pre-filter	25-30	100	50
Dri-Pak 2000 MERV 12, 21''	Bag	60-65	82	250
Dri-Pak 2000 MERV 14, 30''	Bag	80-85	85	275
Dri-Pak 2000 MERV 15, 21''	Bag	90-95	134	300
Varicel MERV 11, 12''	Cartridge	60-65	100	470
Varicel MERV 13, 12''	Cartridge	80-85	130	500
Varicel MERV 14, 12''	Cartridge	90-95	145	530
Astrocel I, 11.5''	HEPA	99,999	350	2,500

\* Snelheidsefficiëntie is getest in overeenstemming met: AM-Air 1100: UL standaard 900. Dri-Pak 2000 en Varicel: ASHRAE 52.2-1999. Astrocel: Dioctyl Phthalate (DOP) fotometer test en Polystyrene Latex bolvormige laser test.

## Specificaties van de gebruikte AAF filters.

- TABEL 1-

$C_{\infty}$  stabiel werd, ook de afname van de stationaire situatie en de RSP verwijderingsefficiëntie van de filters werd gerapporteerd. Het ventilatiedebiet en het energiegebruik van de twee ventilatoren werden eveneens gerapporteerd. Het ventilatievoud werd gemonitord door middel van het SF<sub>6</sub> tracergas. Na voltooiing van een casestudy werd het experiment herhaald met een ander buitenluchtfilter. Dit werd gedaan tot dat alle filters, genoemd in tabel 1, waren gebruikt. Vervolgens werd de filter in de luchtbehandelingkast vervangen door een ander type en werd de hele cyclus opnieuw herhaald. Het duurde ongeveer 1 tot 2 uur om één case te voltooien. In totaal werden ongeveer 40 verschillende cases met verschillende filtercombinaties onderzocht. Om stromingcomplicaties, veroorzaakt door andere luchtbehandelingkasten in hetzelfde gebouw, te voorkomen werden alle onderzoeken verricht tussen 18.00 uur en 08.00 uur (in deze periode werden alle andere luchtbehandelingkasten uitgeschakeld). Een andere reden om het experiment in deze periode uit te voeren was om te voorkomen dat liften een groot buitenluchtvolume de testzone binnen zouden pompen, deze interferentie werd eerder als significant gevonden. Voor een volledige controle over de buitenluchttoevoer werden alle mogelijke wegen die buitenlucht toevoeren, zoals liften, trappenhuis en kanaalopeningen, geïdentificeerd en afgesloten met plastic folie.

## RESULTATEN

### *Systemefficiëntie en effectieve zuiveringssnelheid*

Offerman et al. [15] gaven aan dat de prestatie van de luchtzuivering kenbaar kan worden gemaakt door de systemefficiëntie en effectieve zuiveringssnelheid. De systemefficiëntie  $n$  duidt het verschil aan tussen het stationaire RSP-niveau in een ruimte en het RSP-niveau buiten. Hoe hoger de systemefficiëntie, des te lager is het RSP-niveau in een ruimte.

De systemefficiëntie wordt gegeven door:

$$n = \left(1 - \frac{C_{\infty}}{C_{out}}\right) \cdot 100 \% \quad (1)$$

Waarbij  $C_{\infty}$  de stationaire RSP-concentratie binnen is en  $C_{out}$  de concentratie RSP buiten.

De effectieve zuiveringssnelheid ( $R$ ) duidt de tijd aan die benodigd is voor het afnemen van het RSP-niveau van een hoog niveau naar een stationair laag niveau.  $R$  is verkregen uit een dynamische massabalans vergelijking [6] waarin geldt:

$$\frac{dC_t}{dt} = C_{out} \frac{[Q_f(1-N_f) + Q_{if}(n_{if})]}{V} + S - C_t \frac{[Q_f + Q_{if} + Q_v N_v + K]}{V} \quad (2)$$

Als  $S$  en  $C_{out}$  constant zijn, dan vormt vergelijking 2 de oplossing:

$$C_t = (C_0 - C_{\infty})e^{-Rt} + C_{\infty} \quad (3)$$

waarin

$$C_{\infty} = \frac{[Q_f(1-N_f) + Q_{if}(n_{if})] C_{out} + S}{R} \quad (4)$$

en

$$R = \frac{Q_f + Q_{if} + Q_v N_v + K}{V} \quad (5)$$

$R$  is de effectieve zuiveringssnelheid. Deze omvat verloren mechanismen door verdunning van de buitenlucht, exfiltratie, retourlucht filtratie, oppervlakafzetting en kanaalverlies. De aanwezigheid van RSP-emissiebronnen in een ruimte maakt het modelleren van RSP in een ruimte erg gecompliceerd. Het experiment werd verricht zonder een RSP-emissiebron in de ruimte, dus  $S$  is nul. Dit is de belangrijkste beperking van dit onderzoek. Een goed literatuuroverzicht van IAQ-modellen kan worden gevonden in [6].

Figuur 2 geeft een typisch verval van RSP in een ruimte weer. Extractie van de waarden van  $C_{\infty}$ ,  $C_0$  en  $R$  zijn eveneens aangegeven.  $C_{out}$  was het gemiddelde buitenniveau RSP in deze periode.

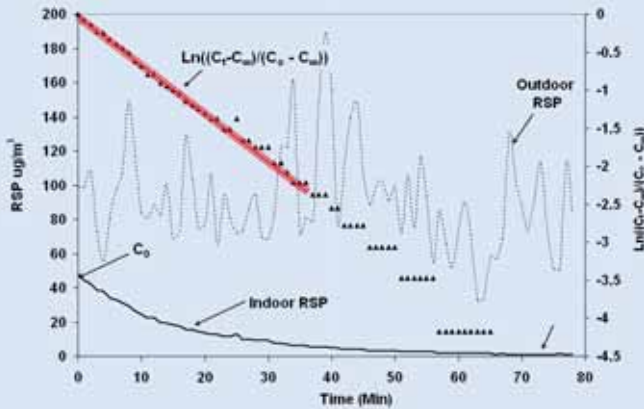
### *Luchtbehandelingkast (AHU) uitgerust met een pre-filter als de filtratie-efficiëntie van de buitenluchtfilter verhoogd is.*

In veel commerciële gebouwen is het gebruikelijk om pre-filters te plaatsen in een ventilator van de luchtbehandelingkast en om in de buitenluchtventilator geen filter te plaatsen. Het eerste experiment werd verricht om de

potentiële verbetering te verkennen van het verhogen van de filtratie-efficiëntie van de buitenlucht toevoer. Figuur 3 geeft de variatie van  $C_{\infty}/C_{out}$  weer met verschillende buitenluchtfilters, de pre-filters in de luchtbehandelingkast zijn hierbij niet veranderd. Het ventilatiedebiet van de ventilator in de luchtbehandelingkast en de buitenluchtventilator was respectievelijk 3,7 m<sup>3</sup>/s en 0,45-0,54 m<sup>3</sup>/s. Uit figuur 3 lijkt te volgen dat lage concentraties RSP in een ruimte kunnen worden verkregen door alleen filtratie van de buitenluchttoevoer toe te passen. Hoe hoger de efficiëntie van de filtratie is, des te lager is de ratio  $C_{\infty}/C_{out}$ . Significante reductie van de binnenconcentratie RSP ontstond als de efficiëntie van de buitenlucht filtratie de 60 % oversteege. Als er gebruikt werd gemaakt van een HEPA-filter dan was  $C_{\infty}/C_{out}$  0.01. Voor een verondersteld buitenniveau RSP van 200 µg/m<sup>3</sup> zou het stationaire RSP-niveau in een ruimte ( $C_{\infty}$ ) 2 µg/m<sup>3</sup> zijn. Deze waarde voldoet ruimschoots aan de 'excellente' IAQ-doelstelling. Hieruit volgt dat het mogelijk is om in bestaande gebouwen, zonder grote aanpassingen, een 'excellente' IAQ te verkrijgen als er in de ruimte geen bron van verontreiniging aanwezig is.

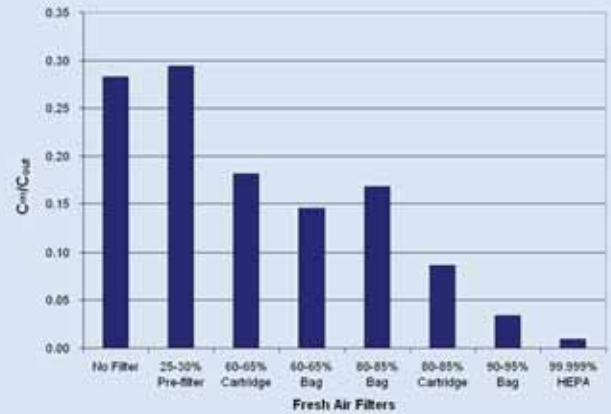
Een interessant punt is dat de  $C_{\infty}/C_{out}$  waarde 0,28 bedroeg in de situatie waarbij geen buitenluchtfilter was geplaatst. Dit resultaat impliceert dat zelfs met een minimale beheersing het RSP-niveau in een commercieel gebouw lager is dan het RSP-buitenniveau. De meest overeenkomende vergelijking van deze case kan worden gevonden in [8]. Hun modelleerresultaten laten zien dat  $C_{\infty}/C_{out}$  ongeveer 0.26 was voor 30 % filterefficiëntie bij de retourlucht (geen buitenluchtfilter) en voor helemaal geen filters was  $C_{\infty}/C_{out}$  ongeveer 0,75. Ondanks dat hun gemodelleerde resultaat  $C_{\infty}/C_{out}$  dicht bij het resultaat lag wat werd gevonden in dit onderzoek,  $C_{\infty}/C_{out}$  is 0,28 (figuur 3), is het niet toegestaan om de resultaten direct met elkaar te vergelijken. De resultaten die werden gevonden bij het eerder genoemde onderzoek zijn gebaseerd op het aantal stofdeeltjes in de lucht, binnen dit onderzoek zijn de resultaten gebaseerd op de massa van de stofdeeltjes in de lucht. Om de reden te achterhalen waarom de concentratie RSP in een ruimte in





Verval van RSP in een ruimte ( $C_i$ ) met de tijd en de extractie van  $C_{\infty}$  en  $C_o$ . De driehoekjes zijn  $\ln[(C_i - C_{\infty}) / (C_o - C_{\infty})]$

- FIGUUR 2-



De verhouding van de stationaire concentratie RSP in een ruimte en de beginconcentratie RSP buiten ( $C_{\infty} / C_{out}$ ) bij verschillende buitenluchtfilters (AHU-filter = pre-filter)

- FIGUUR 3-

een airconditioned gebouw altijd lager is dan buiten, is er gekeken naar vergelijking 4. Als S is nul geldt:

$$\frac{C_{\infty}}{C_{out}} = \frac{Q_f(1 - N_f) + Q_{if}(n_{if})}{VR} = \frac{Q_f(1 - N_f) + Q_{if}(n_{if})}{Q_f + Q_{if} + Q_v N_v + K} \quad (5)$$

In de bovengenoemde case was  $N_f=0$ ,  $Q_f=0,54 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $N_v=0,3$ ,  $Q_v=3,7 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $Q_{if}=0,027 \text{ m}^3/\text{s}$ ,  $n_{if}=0,8$  en er werd aangenomen dat  $K=0$ . De verhouding  $C_{\infty} / C_{out}$  is geschat op 0,33, dat nabij het resultaat ligt van het praktijkonderzoek (0,28). De verhouding tussen het ventilatie-debiet  $Q_f$  van de buitenlucht en het ventilatie-debiet  $Q_v$  van de retourlucht was ongeveer 1 tot 7. De verhouding tussen de infiltratie  $Q_{if}$  en  $Q_f$  was ongeveer 1 tot 20. De gedeeltelijke winst van infiltratie is een orde van grootte kleiner dan het gedeeltelijke verlies door de filtratie van de retourlucht. Er wordt verwacht dat de waar-

de van  $C_{\infty} / C_{out}$  ongeveer 1/3 is wanneer er een pre-filter geplaatst is in het luchtbehandelingsysteem, en waarbij er bij de buitenluchttoevoer geen filter is geplaatst.

Een ander interessant punt dat een discussie waard is, is het verschil tussen de geschatte  $C_{\infty} / C_{out}$  van 0,33 en de in de praktijk gemeten waarde van 0,28. Als het verschil wordt veroorzaakt door  $K$  (afzetting en andere verliezen), dan is  $K$  ongeveer  $0,31 \text{ m}^3/\text{s}$ . Echter, als dezelfde calculatie wordt herhaald voor de tweede case in figuur 3, waarbij een pre-filter werd aangebracht bij de buitenluchttoevoer, dan wordt  $K$  30. Het gemiddelde van  $K$  voor alle acht cases in figuur 3 is bijna nul en de standaarddeviatie is  $0,46 \text{ m}^3/\text{s}$ .

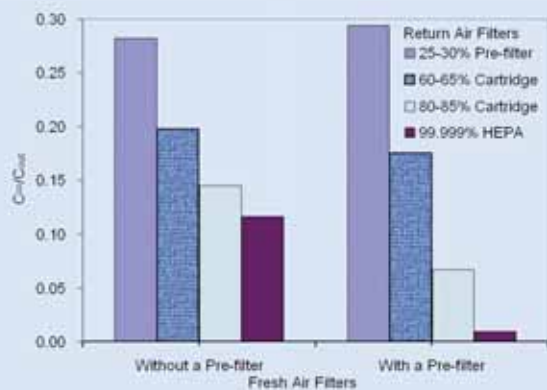
**Buitenluchtventilator uitgerust met een pre-filter / geen filter bij een verhoogde filtratie-efficiëntie van de ventilator van de luchtbehandeling**

Het tweede experiment had als doel om de potentiële verbetering te ver-

kennen die wordt veroorzaakt door de filtratie-efficiëntie van de retourlucht. De rechter grafiek in figuur 4 geeft de variatie weer van  $C_{\infty} / C_{out}$  bij verschillende retourluchtfilters, het pre-filter bij de buitenluchtfilter bleef onveranderd.

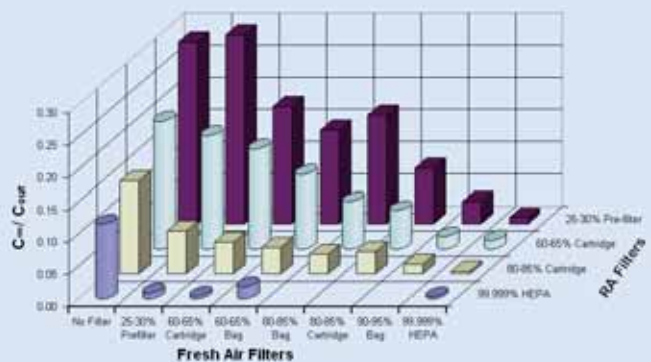
De linker grafiek geeft de variatie weer van  $C_{\infty} / C_{out}$  voor verschillende retourluchtfilters zonder filter bij de buitenluchtventilator. Zakkenfilters bij de retourluchtventilator konden niet worden getest vanwege de technische complexiteit. Het ventilatie-debiet van de retourlucht lag tussen de 3,3 en 3,7  $\text{m}^3/\text{s}$ , terwijl het ventilatie-debiet van de buitenluchtventilator rond de 0,5  $\text{m}^3/\text{s}$  lag.

De linker grafiek in figuur 4 duidt aan dat lage concentraties RSP in een ruimte ook kunnen worden bereikt door alleen de retourlucht te filteren. Hoe hoger de filtratie-efficiëntie is, des te lager is de verhouding  $C_{\infty} / C_{out}$ . Wanneer er een HEPA-filter werd gebruikt



De verhouding van de stationaire RSP in een ruimte en de beginconcentratie RSP buiten ( $C_{\infty} / C_{out}$ ) bij verschillende retourluchtfilters (buitenluchtfilter = zonder filter en pre-filter).

- FIGUUR 4-



De verhouding van de stationaire RSP in een ruimte en de beginconcentratie RSP buiten ( $C_{\infty} / C_{out}$ ) bij verschillende buitenluchtfilters en verschillende retourluchtfilters.

- FIGUUR 5-

was de verhouding  $C_{\infty}/C_{out}$  0,12. Voor een verondersteld buitenniveau RSP van  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , zou de stationaire concentratie RSP in een ruimte ( $C_{\infty}$ )  $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$  zijn. Dit betekent dat het 'excellente' IAQ-doel niet kan worden bereikt op belangrijke dagen, zelfs als de buitenlucht niet is behandeld. Hoe dan ook, door eenvoudigweg een pre-filter bij de buitenlucht toevoeren te plaatsen, kan de verhouding  $C_{\infty}/C_{out}$  substantieel worden verlaagd. Dit experiment leidt tot een praktische aanbeveling. In situaties waarbij het verwijderen van RSP in een ruimte afhangt van filtratie van de retourlucht, verhoogt de luchtzuivering aanzienlijk door het toevoegen van een pre-filter aan de buitenluchttoevoer.

### Filtratie efficiëntie van de AHU en de buitenluchtventilator zijn beiden verhoogd

Het experiment werd voortgezet om de verbeteringen te verkennen die werden veroorzaakt door verschillende andere combinaties van retourlucht- en buitenluchtfilters. Figuur 5 geeft de variatie weer van  $C_{\infty}/C_{out}$  voor verschillende buitenluchtfilters en verschillende retourluchtfilters (figuur 3 en 4 zijn een deelverzameling van figuur 5). Figuur 5 laat duidelijk zien dat zowel de buitenluchtfilters als de retourfilters een belangrijke rol spelen in de reductie van de concentratie RSP in een ruimte. Het verhogen van de filtratie-efficiëntie bij de buitenluchttoevoer, terwijl de retourluchtfilters onveranderd bleven, leidde tot een verlaging van de RSP-concentratie in een ruimte en vice versa. De maximale  $C_{\infty}/C_{out}$  was ongeveer 0,3 als er een minimale beheersing van de RSP werd uitgeoefend.

De verhouding  $C_{\infty}/C_{out}$  daalde naar nul wanneer beide ventilatoren werden uitgerust met HEPA-filters, de ventilatiezone werd hiermee een cleanroom. Voor een veronderstelde buitenconcentratie RSP van  $200 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , is de verhouding  $C_{\infty}/C_{out}$ , bij  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  RSP, 0.1. Figuur 5 laat zien dat redelijk veel filtercombinaties een verhouding van  $C_{\infty}/C_{out}$  kleiner dan 0.1 kunnen halen. Hieruit kan worden geconcludeerd dat het gebruik van HEPA-filters adequaat, maar niet noodzakelijk is in deze toepassing. Daar komt bij dat HEPA-filters veel duurder en moeilijker toepasbaar zijn voor dagelijkse elektrische en mechanische (E&M) besturing.

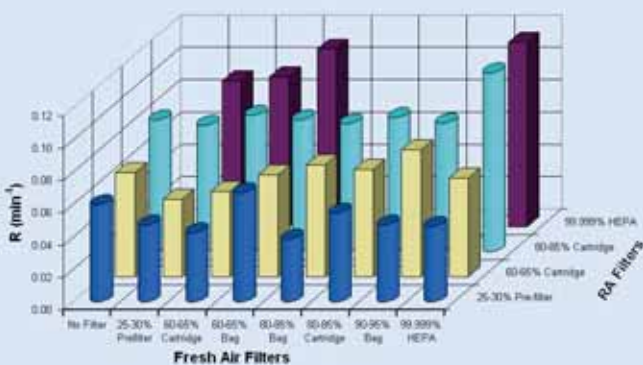
### Effectieve zuiveringsnelheid

Een goed filtratiesysteem zou ook een hoge effectieve zuiveringsnelheid dienen te hebben. Uit vergelijking 3 volgt dat R de helling is van  $\ln [(C_t - C_{\infty}) / (C_0 - C_{\infty})]$  tegen de tijd  $t$  (Figuur 2). Hoe hoger de effectieve zuiveringsnelheid R is, des te korter duurt het voordat het binnenniveau RSP  $C_{\infty}$  bereikt. Figuur 6 geeft de effectieve zuiveringsnelheid R weer bij verschillende filtercombinaties. Uit deze grafiek kan worden geconcludeerd dat de buitenluchtfilters geen significante invloed hadden op R. Er was geen trend aanwezig op elke rij waar de retourluchtfilters onveranderd bleven. Maar R nam toe als de retourlucht filtratie-efficiëntie toenam, terwijl het buitenluchtfilter onveranderd bleef. In het algemeen gold dat R werd geregeld door de filtratie van de retourlucht.

### Stationaire binnen RSP niveaus $C_{\infty}$ en effectieve zuiveringstijd bij drie verschillende scenario's

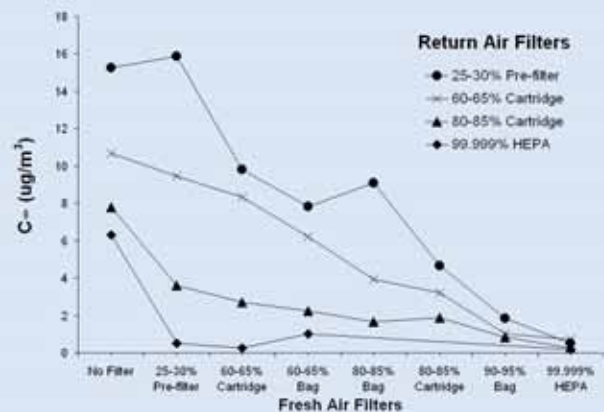
De volgende stap was om te onderzoeken welke filtercombinaties de 'excellente' IAQ konden bereiken, in termen van RSP. Dit betekent dat het ventilatiesysteem  $C_{\infty}$  binnen 1 uur beneden  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  dient te brengen. De reden voor de tijdslimiet van 1 uur zijn de kantooractiviteiten. Veel commerciële gebouwen in Hong Kong zetten het ventilatiesysteem aan om 8.00 uur en zetten het weer uit om 18.00 uur. De kantooruren zijn tussen 9.00 uur en 17.00 uur. Hieruit volgt dat als  $C_{\infty}$  beneden  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  is voor 9.00 uur, dan wordt de 8 uur gemiddelde 'excellente' IAQ-doelstelling bereikt gedurende de kantooruren.

Figuur 5 geeft de relatieve prestatie ( $C_{\infty}/C_{out}$ ) weer voor verschillende filtercombinaties bij de beheersing van RSP-niveaus in een ruimte ( $C_{\infty}$ ), maar figuur 5 kan niet weergeven of  $C_{\infty}$  daadwerkelijk kleiner is dan  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Om de  $C_{\infty}$  waarden te vergelijken bij verschillende filtercombinaties is het noodzakelijk om buiten een constant RSP-niveau ( $C_{out}$ ) in te stellen. In navolging van de buitenluchtkwaliteit in Hong Kong in 2000 [3] werden er drie representatieve RSP-buitenwaarden ( $C_{out}$ ) gekozen voor deze oefening. Als eerste werd er gekozen voor het hoogste 24 uur RSP-gemiddelde dat werd geregistreerd in 2000 in Hong Kong, dit was  $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Dit werd gekozen als worst-case scenario, omdat dit een sterk verontreinigende dag representeert. Als tweede werd er gekozen voor een normale dag in Causeway Bay, een druk stedelijk gebied. Het jaarlijkse gemiddelde in Causeway Bay was  $101 \mu\text{g}/\text{m}^3$ . Als derde werd er gekozen voor het totale jaarlijkse RSP-gemiddelde voor alle meetstations in Hong Kong van



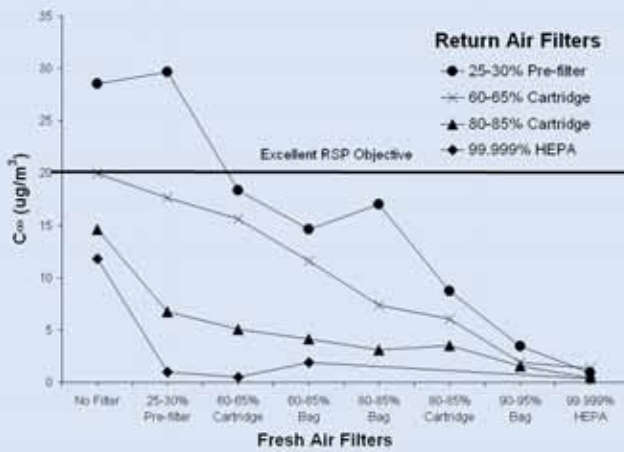
De effectieve zuiveringsnelheid bij verschillende buitenluchtfilters en verschillende retourluchtfilters.

- FIGUUR 6-



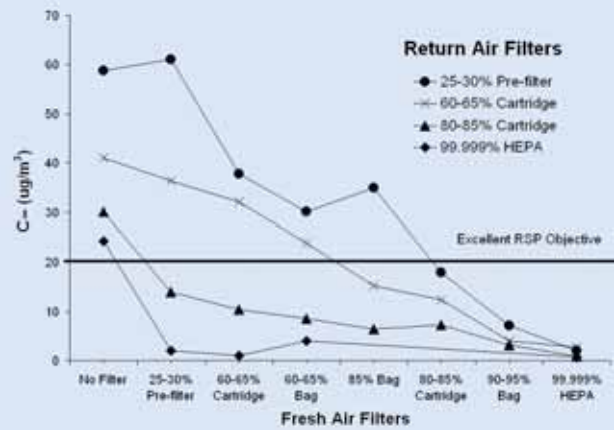
De stationaire RSP concentratie binnen voor verschillende filtercombinaties als het buitenniveau RSP  $54 \mu\text{g}/\text{m}^3$  is

- FIGUUR 7-



De stationaire RSP concentratie binnen voor verschillende filtercombinaties als het buitenniveau RSP 101 µg/m<sup>3</sup> is.

- FIGUUR 8-



De stationaire RSP concentratie binnen voor verschillende filtercombinaties als het buitenniveau RSP 208 µg/m<sup>3</sup> is.

- FIGUUR 9-

54 µg/m<sup>3</sup>. Deze waarde representeert een redelijk algemene situatie in Hong Kong. De luchtkwaliteit in 2001 en 2002 werd ook genoteerd. Omdat de cijfers van 2001 en 2002 enigszins lager waren, werd gekozen voor de cijfers van 2000. De  $C_{\infty}$  voor verschillende filtercombinaties, bij een constante  $C_{out}$ , kan worden verkregen door alle  $C_{\infty}/C_{out}$  waarden in figuur 5 met een geselecteerde  $C_{out}$  waarde te vermenigvuldigen. De tijd ( $t$ ) die benodigd is voor het bereiken van het standaard niveau (20 µg/m<sup>3</sup>) is genomen als de tijd tussen de starttijd van een casestudy ( $t=0$ ) en de tijd wanneer  $C$  voor het eerst de waarde van 20 µg/m<sup>3</sup> bereikte.  $t$  wordt gegeven door:

$$t = \frac{\ln\left(\frac{20 - C_{\infty}}{C_0 - C_{\infty}}\right)}{R} \quad (6)$$

$R$  is hierin de effectieve zuiveringssnelheid die werd bereikt in iedere case.

**Case 1:** beheersing van binnen RSP voor een redelijke algemene situatie in Hong Kong (buitenconcentratie RSP is 54 µg/m<sup>3</sup>). Figuur 7 laat zien dat alle  $C_{\infty}$  waarden kleiner waren dan 20 µg/m<sup>3</sup>, inclusief de gevallen waarbij er geen buitenluchtfilters aanwezig waren en er alleen pre-filters bij de retourlucht waren geïnstalleerd. Omdat 54 µg/m<sup>3</sup> een redelijk algemene situatie in Hong Kong representeert, betekent dit dat 20 µg/m<sup>3</sup> redelijk eenvoudig kan worden gehaald in heel Hong Kong als de buitenluchtkwaliteit goed is. Tabel 2 laat zien dat niet alle filtercombinaties de  $C_{\infty}$  waarden binnen 60 minuten beneden 20 µg/m<sup>3</sup> kunnen brengen. Hieruit volgt dat de effectieve

zuiveringssnelheid  $R$  de bepalende parameter is in deze case. Omdat  $R$  meestal wordt geregeld door het retourluchtfilter, kan de algemene praktijk waarin enkel een pre-filter bij de retourlucht wordt geïnstalleerd (geen buitenluchtfilter), de 'excellente' IAQ-doelstelling niet bereiken in termen van RSP. Deze kan zelfs niet worden bereikt als de buitenluchtkwaliteit goed is. Het is noodzakelijk om de filtratie-efficiëntie te verhogen bij zowel de AHU als bij de buitenluchtventilatoren. Een aanvaardbare instelling voor dit scenario is een 60-65 % filter bij de retourlucht en een 60-65 % filter bij de buitenlucht. Het duurde ongeveer 50 minuten voordat dit ventilatiesysteem de stationaire situatie bereikte.

**Case 2:** de controle van binnen RSP voor Causeway Bay (buitenconcentratie RSP is 20 µg/m<sup>3</sup>). Als de buiten RSP toenam tot 20 µg/m<sup>3</sup>, dan kon niet in alle gevallen in figuur 8 een  $C_{\infty}$  waarde worden bereikt van kleiner dan 20 µg/m<sup>3</sup>. Wanneer de retourlucht alleen wordt gezuiverd door pre-filters, dan moet de buitenluchttoevoer worden beheerst om de IAQ RSP-doelstelling tegemoet te komen. Figuur 8 laat zien dat als de filtratie-efficiëntie van de retourluchtfilters de 60 % overstijgt, dat dan alle  $C_{\infty}$  waarden lager dan 20 µg/m<sup>3</sup> zijn, inclusief de gevallen waarbij er geen buitenluchtfilter aanwezig was.

Tabel 3 laat zien dat de zuiveringstijd in de meeste gevallen de 60 minuten overschrijdt. Hieruit volgt dat ook in deze case  $R$  de bepalende parameter is. Het is noodzakelijk om zowel de filtratie-efficiëntie van de retourlucht als van de buitenlucht te regelen. De aan-

vaardbare instelling voor case 1 (60-65 % filter voor de retourlucht en 60-65 % filter voor de buitenlucht) voldoet ook voor deze case. Het duurde ongeveer 50 minuten voordat dit ventilatiesysteem de stationaire situatie bereikte. Omdat 101 µg/m<sup>3</sup> het algemene RSP-niveau in Causeway Bay representeert, betekent dit dat de minimale beheersing van de RSP het 'excellente' IAQ-niveau niet kan bereiken in centrumgebieden. Zowel de retourlucht als de buitenlucht dient te worden behandeld om een laag RSP-niveau in een ruimte te kunnen handhaven.

**Case 3:** de controle van binnen RSP op sterk verontreinigende dagen (buiten concentratie RSP is 208 µg/m<sup>3</sup>). Wanneer het RSP-niveau buiten toenam tot 208 µg/m<sup>3</sup>, waren er veel meer gevallen waarbij de  $C_{\infty}$  waarden de 20 µg/m<sup>3</sup> overstegen. Op belangrijke dagen, als er geen filter in de buitenluchttoevoer was geplaatst, overstegen alle  $C_{\infty}$  waarden de 20 µg/m<sup>3</sup> en konden de  $C_{\infty}$  waarden nooit de 'excellente' IAQ-doelstelling bereiken. Wanneer de retourlucht alleen was voorzien van pre-filters kon  $C_{\infty}$  de 'excellente' IAQ-doelstelling ook niet worden bereikt, tenzij de filtratie-efficiëntie van de buitenluchttoevoer de 80 % oversteepte. Om  $C_{\infty}$  te verlagen onder de 20 µg/m<sup>3</sup> voor dit scenario, is het daarom noodzakelijk om filters met een efficiëntie van meer dan 80 % te plaatsen bij de retourlucht of bij de buitenlucht. Voor de zuiveringstijd laat tabel 4 zien, dat apart van het gebruik van HEPA-filters, verschillende niet-HEPA-combinaties ook de 'excellente' IAQ-doelstelling kunnen bereiken. Als er alleen pre-filters werden gebruikt bij de

Outdoor air filters	Return air filters			
	25-30 % pre-filter	60-65 % cartridge	80-85 % cartridge	99,999 % HEPA
No filter	(61,3)	47,1	34,4	*
25-30 % pre-filter	*	(60,7)	32,3	26,2
60-65 % cartridge	(69,0)	53,5	29,3	25,4
60-65 % bag	41,4	42,6	30,1	21,8
80-85 % bag	(74,4)	36,6	30,5	*
80-85 % cartridge	46,9	37,6	29,3	*
90-95 % bag	51,1	30,8	29,9	*
99,999 % HEPA	50,5	33,6	21,3	20,7

De zuiveringstijd t (in minuten) voor verschillende filtercombinaties als het buitenniveau RSP 54 µg/m³ is.

- TABEL 2-

Outdoor air filters	Return air filters			
	25-30 % pre-filter	60-65 % cartridge	80-85 % cartridge	99,999 % HEPA
No filter	#	(129,8)	43,9	*
25-30 % pre-filter	#	(91,0)	34,8	26,4
60-65 % cartridge	(110,3)	(71,1)	30,9	25,5
60-65 % bag	53,0	50,0	31,4	22,2
80-85 % bag	(106,2)	39,8	31,5	*
80-85 % cartridge	52,1	40,1	30,4	*
90-95 % bag	52,9	31,4	30,4	*
99,999 % HEPA	50,9	34,0	21,3	20,7

De zuiveringstijd t (in minuten) voor verschillende filtercombinaties als het buitenniveau RSP 101 µg/m³ is.

- TABEL 3-

Outdoor air filters	Return air filters			
	25-30 % pre-filter	60-65 % cartridge	80-85 % cartridge	99,999 % HEPA
No filter	#	#	#	#
25-30 % pre-filter	#	#	44,3	27,0
60-65 % cartridge	#	#	35,8	25,8
60-65 % bag	#	#	35,1	23,2
80-85 % bag	#	53,1	34,0	*
80-85 % cartridge	(81,9)	48,8	33,3	*
90-95 % bag	57,7	32,8	31,4	*
99,999 % HEPA	52,0	35,0	21,5	20,9

De zuiveringstijd t (in minuten) voor verschillende filtercombinaties als het buitenniveau RSP 208 µg/m³ is.

- TABEL 4-



retourlucht, dan konden 90-95 % of zelfs nog betere buitenluchtfilters de doelstelling bereiken. Als er 60-65 % filters gebruikt werden bij de retourlucht, dan waren er 80-85 % of nog betere buitenluchtfilters benodigd. Als er 80-85 % filters werden gebruikt bij de retourlucht, dan waren pre-filters bij de buitenluchttoevoer voldoende. De minimale instelling voor case 1 en 2 (60-65 % filter bij de retourluchtventilator en bij de buitenluchtventilator) was niet toereikend voor deze case. Omdat  $208 \mu\text{g}/\text{m}^3$  een sterk verontreinigende dag representeert kunnen alle drie de filterinstellingen worden aanbevolen. Alle drie de opties kunnen de 'excellente' IAQ-doelstellingen in termen van RSP bereiken.

- pre-filters bij de retourlucht en een 90-95 % filter bij de buitenlucht;
- 60-90 % filters bij de retourlucht en 60-90 % filters bij de buitenlucht;
- HEPA-filters bij de retourlucht of bij de buitenlucht. Als er een HEPA-filter wordt gebruikt aan de buitenluchtzijde, dan dient er een pre-filter te worden gebruikt bij de retourlucht en vice versa.

De resultaten in figuur 9 en tabel 4 duiden aan dat de 'excellente' IAQ-doelstelling zelfs kan worden bereikt op belangrijke dagen, zonder het gebruik van HEPA-filters. Het gebruik van hoge efficiëntie filters (60-90 %) was voldoende om een hele schone kantooromgeving te handhaven. Wanneer de buitenomgeving RSP bevat is het belangrijk om, wanneer er een schone binnenomgeving dient te worden gerealiseerd, de RSP te verwijderen uit de buitenluchttoevoer voor

dat deze lucht het gebouw in komt. Dit experiment heeft onthuld dat dit geen adequate conditie is. Het zijn de AHU buitenluchtfilters die de effectieve zuiveringssnelheid bepalen. Dus, zowel de buitenluchtfilters als de retourluchtfilters zijn belangrijk. Het is noodzakelijk om zowel de filtratie-efficiëntie bij de retourlucht als bij de buitenluchttoevoer te beheersen. De meeste bestaande AHU zijn uitgerust met een filtercompartiment. Er zijn geen modificaties nodig voor de installatie van 80 % van de retourluchtfilters. De moeilijkheid ligt in de beheersing van de buitenlucht.

### Stationaire afname en stroming bij de retourlucht

De vervanging van de pre-filters door hoge efficiëntiefilters in bestaande ventilatiesystemen zal ongetwijfeld een stationaire afname en een verlaging van de luchttoevoer teweegbrengen. Dit kan het comfortniveau in de ruimte beïnvloeden. De stationaire afname en de luchttoevoer van de AHU voor verschillende filters zijn weergegeven in figuur 10. Hieruit kan worden afgelezen dat hogere efficiëntiefilters een hogere stationaire afname hebben. De stationaire afname van een pre-filter was klein, daar waar de 60-90 % filters vergelijkbaar waren met elkaar. De HEPA-filter had de hoogste stationaire afname, dat ongeveer vijf keer meer was dan de stationaire afname van een pre-filter. Verbaazingwekkend genoeg laat de AHU een grote tolerantie zien voor de verhoging van de stationaire afname. De luchttoevoer nam slechts licht af. Het psychometrische ontwerp van het ventilatiesysteem werd niet beïnvloed. Dit

komt waarschijnlijk door de hoge stationaire afname van het gehele luchtkanaaltoevoersysteem.

### Kostenanalyse

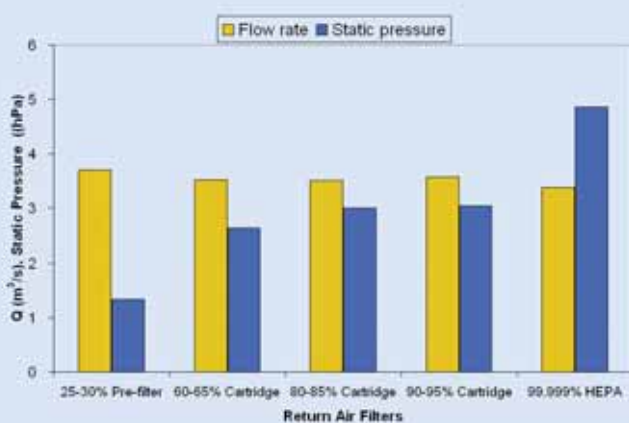
Economische overwegingen zijn een manier om te bepalen wat de uitvoerbaarheid van dergelijke ventilatiesystemen is. Een rechtdoorzee methode is om de som te berekenen van het energiegebruik en de filterkosten, en vervolgens de totale kosten van de verschillende filtercombinaties te vergelijken. Echter, deze methode neemt niet de voordelen mee die oplopen als een resultaat van de hogere kosten. In plaats daarvan is een genormaliseerde prijs geïntroduceerd per 1 % systeemefficiëntie  $\Psi$ , dit is gedaan om de totale kosten te kunnen evalueren voor verschillende filter-ontwerpen.

De kosten per 1 % systeemefficiëntie is  $\Psi$ :

$$\frac{\text{Totale Kosten}}{\left(1 - \frac{C_{\text{statisch}}}{C_{\text{out}}}\right)} \cdot 100\% \quad (7)$$

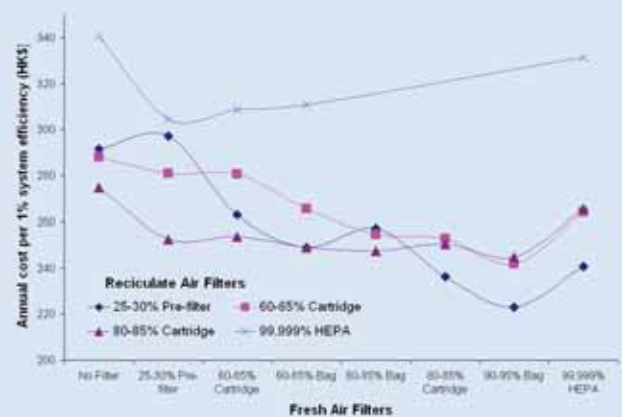
De totale kosten bevatten de kosten voor de aanschaf van de AHU en de buitenluchtventilator, de energiekosten en de kosten van de filters. Deze kosten van de twee ventilatoren werden bepaald door het managementkantoor. De energiekosten van de ventilatoren werden in alle cases door middel van twee kilowattuurmeters gedurende de test geregistreerd. De kosten van de filters zijn weergegeven in tabel 1. Voor alle filters werd aangenomen dat deze gedurende zes maanden intact blijven.

Figuur 11 geeft de genormaliseerde



Stationaire afname en luchtstroom van de retourlucht als er verschillende filters waren geïnstalleerd.

- FIGUUR 10-



Vergelijking van de totale jaarlijkse kosten per 1 % systeemefficiëntie bij verschillende filtercombinaties.

- FIGUUR 11-

kosten  $\Psi$  weer voor verschillende filtercombinaties. Het is geen verrassing dat de installatie van een HEPA-filter bij de retourlucht (de bovenste curve) de meest oneconomische optie is, omdat een HEPA-filter vijf keer duurder is dan de andere filters. Ondanks dat het de binnenomgeving super zuiver maakte, kon de winst in systeem-efficiëntie door gebruikmaking van een HEPA-filter de verhoging in totale kosten niet compenseren. Aan de lage efficiëntie zijde, was alleen het gebruik maken van een pre-filter ook geen economische optie. Het is waar dat de totale kosten het laagst zijn, maar de lage systeemefficiëntie die verbonden is aan deze optie compenseert het kostenvoordeel, dat wordt afgespiegeld door een hoge  $\Psi$ . Er bleek dat de meest economische optie was om pre-filters te installeren bij de retourlucht en een 90-95 % zakkenfilter bij de buitenlucht. Figuur 9 en tabel 4 laten zien dat deze filtercombinatie de 'excellente' IAQ-doelstelling kan bereiken, zelfs bij een sterk verontreinigende omgeving (worstcase scenario). Andere filtercombinaties die ook het gebruik van filter cartridges of zakkenfilters met een filterefficiëntie groter dan 60 % meenamen, zijn goede opties. Zowel de prestatie als de kosten van 60-65 %/80-80 % bij de retourlucht en 60-65 %/80-80 % bij de buitenlucht verschillen niet veel van elkaar. De bijkomende kosten die bij de installatie van betere filters opliepen, verhoogden de operationele kosten, omdat er hiervoor nieuwe buitenluchtventilatoren benodigd waren. Ook kostten betere filters meer en het energiegebruik nam toe door de hogere stationaire afname. Als de combinatie 60-90 % buitenlucht/ 60-90 % retourlucht wordt aangenomen, dan is de toename van de totale kosten kleiner dan 5 % van de bestaande operationele kosten.

#### **Beperkingen van dit onderzoek**

Er zijn verschillende beperkingen binnen dit onderzoek. Allereerst werd voor de binnen RSP-emissiebronnen aangenomen dat deze verwaarloosbaar waren in de testzone. Deze aanname is, in het algemeen, alleen geldig in een kantooromgeving waar niet wordt gerookt [9]. In de praktijk hebben winkelcentra en restaurants significante RSP-bronnen. Ten tweede werd de toegang van buitenlucht tot de zone

volledig gecontroleerd door alle mogelijke infiltratiewegen zoals de liften, de tappenhuizen en de nooddeuren af te dichten. Deze procedure maakte het mogelijk om de filtratie-efficiëntie van de buitenluchttoevoer nauwkeurig te meten. In de praktijk vereist de toegang van buitenlucht in een commercieel gebouw veel meer ervaring. Ten derde bleef er een natuurlijke ventilatie met een ventilatievoud van  $0,07 \text{ h}^{-1}$  op de achtergrond aanwezig (bepaald aan de hand van  $\text{SF}_6$  tracer gas technologie). Deze ventilatie representeert de infiltratie door spleten in de raamconstructie en muurlekkages. [18] schatten dat de doordringing van stof door de gebouwschil van een kantoor varieerde tussen 0,69 en 0,86. Voor een ventilatievoud van 1, is de fout in het schatten van de RSP, die ontstaat door gebouwlekkages, niet groter dan 6 %. Ten vierde: ondanks dat de effectieve zuiveringsnelheid R die is verkregen binnen dit onderzoek, zou dienen te worden overheerst door de filtratie van de buitenlucht en de retourlucht, bevat deze ook afzetting aan het oppervlak en kanaalverliezen [13]. Ondanks dat handelt dit onderzoek met de actuele vervaltijd en daardoor is de doelstelling van dit onderzoek niet ondermijnd. Ten vijfde was de testzone niet onderverdeeld in delen. De luchtstroom in de ruimte werd alleen geblokkeerd door een paar kolommen. In werkelijkheid zal een ventilatiezone worden opgedeeld door wanden, die het stromingspatroon en het effectieve ventilatievoud zullen veranderen. Ten slotte is ook de levensduur van de filters niet getest.

#### **CONCLUSIE**

Het is uitvoerbaar om de 'excellente' IAQ RSP-niveaus te bereiken in bestaande commerciële gebouwen in Hong Kong. In gebouwen waar de buitenluchttoevoer goed gedefinieerd is en kan worden gefilterd, kan de 'excellente' IAQ RSP-doelstelling worden bereikt door aan de volgende filtervoorwaarden te voldoen:

- pre-filters bij de retourlucht en een 90-95 % filter bij de buitenlucht;
- 60-90 % filters bij de retourlucht en 60-90 % filters bij de buitenlucht;
- HEPA-filters bij de retourlucht of bij de buitenlucht. Wanneer er een HEPA-filter wordt gebruikt aan de buitenluchtzijde dient er ook een

pre-filter te worden toegepast aan de retourluchtzijde, en vice versa. Een HEPA-filter is geen economische optie, dus het is niet noodzakelijk om HEPA-filters te installeren als de buitenluchttoevoer kan worden geïdentificeerd, geïsoleerd en beheerst. Voor de opties (i) en (ii) waren de bijkomende kosten die optraden ten gevolge van de installatie van betere filters kleiner dan 5 % van de operationele kosten. In gebouwen waar de buitenluchttoevoer niet goed gedefinieerd is, is het noodzakelijk om additionele buitenluchttoevoer ventilatoren te installeren om de controle terug te verkrijgen. HEPA-filters zijn wellicht nodig in dit geval. De stationaire afname van de AHU ventilator zal toenemen, maar de luchtstroom zal niet significant veranderen. Het comfort in de ruimte zal niet worden gecompenseerd.

De buitenluchtfilters hadden een grote invloed op het stationaire RSP-niveau in een ruimte ( $C_{\infty}$ ), hoewel de retourluchtfilters de effectieve zuiveringsnelheid R bepaalden. Als de emissiebronnen in een ruimte klein zijn, dan zijn goede filters bij de buitenlucht voldoende. Als de emissiebronnen in een ruimte substantieel zijn, dan zijn goede filters bij de retourlucht essentieel.

Er wordt verondersteld dat de bevindingen van dit onderzoek zouden kunnen worden geëxtrapoleerd naar de beheersing van TVOC in een ruimte. Echter, er zijn altijd significante TVOC-emissies in een ruimte aanwezig. De beheersing van TVOC in een ruimte hangt af van, of er een 80 % of betere TVOC-gaswasser beschikbaar is. En of deze gaswasser kan worden aangesloten op de bestaande retourlucht.

#### **DANKBETUIGING**

De financiering werd ondersteund door de RGC directe allocatie A-PC61. Dit onderzoek was een samenwerkingsonderzoek tussen Civil and Structural Engineering, PolyU en de Hysan Development Company Limited. De auteurs bedanken de E&M sectie, de property management office en de security office van Hysan Development Company voor hun volledige ondersteuning.



## REFERENTIES

1. ASHRAE (1988) *Practices for Measurement, Testing, Adjusting, and Balancing of Building Heating, Ventilation, Airconditioning, and Refrigeration systems*, ASHRAE, Atlanta, GA, USA, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers (ASHRAE standard 111-1988).
2. ASTM (2000) *Standard Test Method for Determining Air Change in a single zone by means of a Tracer Gas Dilution*, ASTM, PA, USA, American Society for Testing and Materials (ASTM standard E741-2000).
3. HKEPD (2000) *Air Quality in Hong Kong 2000*, Government Printer, Hong Kong, Air Services Group, Environmental Protection Department, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region.
4. HKEPD (2003a) *Guidance Notes for the Management of Indoor Air Quality in Offices and Public Places*, Government Printer, Hong Kong, IAQ Management Group, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, September 2003.
5. HKEPD (2003b) *Guide on Indoor Air Quality Certification Scheme in Offices and Public Places*, Government Printer, Hong Kong, IAQ Management Group, The Government of the Hong Kong Special Administrative Region, September 2003.
6. Jamriska, M, Thomas, S., Morawska, L. and Clark, B.A. (1999) *Relation between indoor and outdoor exposure to fine particles near a busy arterial road*, *Indoor Air*, 9, 75-84.
7. Jamriska, M, Morawska, L. and Clark, A. (2000) *Effect of ventilation and filtration on submicrometer particles in an indoor environment*, *Indoor Air*, 10, 19-26.
8. Jamriska, M, Morawska, L. and Ensor, D.S. (2003) *Control strategies for sub-micrometer particles indoors: model study of air filtration and ventilation*, *Indoor Air*, 13, 96-105.
9. Koponen, K.I., Asmi, A., Keronen, P., Puhto, K. and Kulmala, M. (2001) *Indoor air measurement campaign in Helsinki, Finland 1999 - the effect of outdoor air pollution on indoor air*, *Atmos. Environ.*, 35, 1465-1477.
10. Kulmala, M, Asmi, A. and Pirjola, L. (1999) *Indoor air aerosol model: the effect of outdoor air, filtration and ventilation on indoor concentrations*, *Atmos. Environ.*, 33, 2133-2144.
11. Lee, S.C., Guo, H., Li, W.M. and Chan, L.Y. (2002) *Inter-comparison of air pollutant concentrations in different indoor environments in Hong Kong*, *Atmos. Environ.*, 36, 1929-1940.
12. Liao, S., Ng, D. and Lai, W.Y. (1997) *Consultancy Study for Indoor Air Pollution in Offices and Public Places in Hong Kong*, Government Printer, Hong Kong, Air Services Group, HKSAR.
13. Nazaroff, W.W. and Cass, G.R. (1989) *Mathematical modeling of indoor aerosol dynamics*, *Environ. Sci. Technol.*, 23, 157-166.
14. Offermann, F.J., Sextro, R.G., Fisk, W.J., Grimsrud, D.T., Nazaroff, W.W., Nero, A.V., Revzan, K.L. and Yater, J. (1985) *Control of RSP in indoor air with portable air cleaners*, *Atmos. Environ.*, 19, 1761-1771.
15. Offermann, F.J. III., Loiselle, S.A. and Sextro, R.G. (1992) *Performance of air cleaners in a residential forced air system*, *ASHRAE J.*, 34, 51-57.
16. Reed, C.H., Wallace, L.A. and Emmerich, S.J. (2003) *Effect of ventilation systems and air filters produced by indoor sources in an occupied townhouse*, *Atmos. Environ.*, 37, 5295-5306.
17. Tung, T.C.W., Chao, C.Y.H., Burnett, J., Pang, S.W. and Lee, R.Y.M. (1999a) *A territory wide survey on indoor particulate level in Hong Kong*, *Build. Environ.*, 34, 213-220.
18. Tung, T.C.W., Chao, C.Y.H. and Burnett, J. (1999b) *A methodology to investigate the particulate penetration coefficient through building shell*, *Atmos. Environ.*, 33, 881-893.

## Berichten

### ONLINE OFFERTE BUDERUS

Nefit introduceert voor het merk Buderus voor (groot)zakelijke gebruikers, adviseurs en installateurs een online Offerte Generator voor utiliteitsprojecten. Via de website van Buderus kan men in een paar stappen een offerte aanvragen. Het gaat om offertes voor cv-ketels, cv-ketels met boilers, boilers en warmte/krachtkoppelingen (WKK).

### GOED BEHEER EN ONDERHOUD

De branchevereniging van ondernemingen op het gebied van de koudetechniek en luchtbehandeling (NVKL) is blij met de uitkomst van het SenterNovem-onderzoek naar energiegebruik van koel- en klimaatinstallaties. Het onderzoek onderstreept de NVKL-visie dat vermindering van het energiegebruik vooral moet worden gezocht in goed beheer en onderhoud van de installaties. De NVKL roept bedrijven op om te rade te gaan bij de deskundige. "Goed beheer en onderhoud kan het energiegebruik verminderen tot 35 procent van het totaal."

### OPEN STANDAARDEN?

Stabu heeft met de ontwikkeling van het Project Informatie Management (PIM) systeem nogal wat kritiek te verduren gehad, vooral vanuit de hoek van softwarehuizen. Erkend is nu dat de PIM-systematiek geen "open standaard" maar juist een "open systeem" wil zijn waar alle partners die software produceren voor worden uitgenodigd om in te participeren. Om dit bereiken heeft STABU in samenwerking met haar Belgische partner Bricsys besloten om binnen PIM (het nieuwe STABU-product) zogenaamde connectoren te bouwen om naadloos te kunnen koppelen met bestaande software van derden.