

# **Ventilationsfilters betydelse för inomhusluftens innehåll av partiklar**

## **Beställt av**

Camfil Svenska AB

## **Utfört av**

Lars Ekberg, CIT Energy Management AB

**Mars 2016**

## Innehåll

Introduktion .....	3
Bakgrund .....	3
Syfte.....	3
Kort om hälsoeffekter av luftburna partiklar .....	3
Riktlinjer för god luftkvalitet .....	4
Filterklasser och avskiljningsgrad .....	5
Andra faktorer med påtaglig inverkan på förekomsten av partiklar i inomhusluft .....	8
Ventilationsflödets storlek .....	8
Effektiv ventilation .....	8
Luftläckage genom klimatskalet.....	9
Deposition av partiklar inne .....	10
Beräkningsmodell.....	12
Resultat.....	14
Olika typer av byggnader.....	16
Beräkningar för byggnader med olika ventilationsflöde och olika täthet.....	17
Läckage förbi filtret .....	19
Sammanfattning och slutsatser.....	20
Litteratur.....	23
Bilaga 1. Koncentration inomhus för olika byggnadstyper med glasfiberfilter av olika klass.....	25
Bilaga 2. Koncentration inomhus för olika byggnadstyper, med olika luftomsättning och läckage genom byggnadsskalet.....	26
Bilaga 3. Inverkan av läckage förbi filtret .....	29
Bilaga 4. Mätningar i testkammare .....	30
Bilaga 5. Beräkningsresultat för fall med återluft .....	32
Bilaga 6. Diagram med filterbeteckningar enligt ISO/FDIS 16890 – Fall utan återluft.....	36
Bilaga 7. Diagram med filterbeteckningar enligt ISO/FDIS 16890 – Fall med återluft .....	42

## Introduktion

### Bakgrund

För många inomhusmiljöfaktorer är det tämligen välkänt vad som är en god inomhusmiljö. Just när det gäller luftburna partiklar är dock det miljömedicinska underlaget ännu inte så starkt att man har kunnat etablera några myndighetskrav eller ens några andra någorlunda konkreta riktlinjer. Socialstyrelsen drog i en rapport från 2006 slutsatsen att det ur hälsosynpunkt är viktigt att minimera partikelhalterna såväl inomhus som utomhus. Detta kan tolkas som ett råd att tillämpa "försiktighetsprincipen". Idag innebär detta i de flesta fall att man schablonmässigt installerar filter av klass F7. Om det i själva verket är tillräckligt är det ingen som vet idag.

Föreliggande rapport redovisar beräkningar av inomhusluftens innehåll av luftburna partiklar med ursprung utomhus. Utredningen är inriktad på att studera hur olika val av tilluftsfilter förväntas påverka partikelförekomsten inomhus. Utredningen behandlar bostäder, kontor och klassrum. Gasformiga luftföroreningar behandlas inte i denna rapport.

Beräkningarnas riktighet har verifierats genom jämförelse med mätningar i testkammare i full skala.

### Syfte

Syftet med det redovisade arbetet är att genom beräkningar illustrera i vilken utstäckning det går att reducera inomhusluftens innehåll av luftburna partiklar med hjälp av tilluftsfilter. Beräkningarna är gjorda med en teoretisk modell som tar hänsyn till ventilationsflödets storlek, luftläckage genom byggnadsskalet, deposition av partiklar i inomhusmiljön och filtrets avskiljningsgrad. Utredningen är inriktad på att studera partiklar med ursprung utomhus, exempelvis partiklar genererade av fordons trafik. Utredningen behandlar bostäder, kontor och klassrum.

Eftersom vi tillbringar en stor del av vår tid inomhus – ofta över 85 % - skulle en kraftig reduktion av partikelkoncentrationen inomhus påtagligt kunna minska befolkningens totala exponering för bland annat avgasrelaterade partiklar. Tilluften filtreras ofta med så kallade finfilter – vanligtvis används idag filter av klass F7, men det händer att man använder filter av lägre klass, t ex klass M5. Valet av filterklass sker alltså schablonmässigt. Det redovisade arbetet illustrerar vilken inverkan olika val av filter får för inomhusluftens partikelinnehåll.

### Kort om hälsoeffekter av luftburna partiklar

Under senare år har flera medicinska och miljömedicinska studier pekat på att så kallade ultrafina partiklar kan vara farligare än större partiklar [1a, 1b]. Småpartiklar bildas framförallt vid förbränning, exempelvis i förbränningsmotorer. Avgaser från trafik är således en påtaglig partikelkälla på platser belägna nära trafikerade gator och vägar. Att partiklar i utomhusluft har effekter på människors hälsa har fastställts i många epidemiologiska undersökningar [2, 3, 4, 5, 6]. Många rapporter pekar på att just trafikens avgaser är speciellt hälsovådliga. Det är betydligt färre studier som ägnats åt hälsoeffekter av partiklar genererade inomhus. En del undersökningar tyder på att partiklar från källor inomhus är mindre viktiga [7], medan andra hävdar att det vetenskapliga underlaget inte är tillräckligt för att dra en sådan slutsats [8].

Det är inte bara andningsvägarna som påverkas av luftburna partiklar; den miljömedicinska forskningen har också visat på en koppling mellan exponering för ultrafina partiklar och hjärt-kärlsjukdom. Hälsosfarligheten kan förstås vara kopplad till vilket ämne partikeln består av eller vilka ämnen som bärs av partikeln. En annan viktig orsak till hälsopåverkan tycks vara just att partiklarna är små. Man brukar säga att ultrafina partiklar är alla partiklar som är mindre än 0,1 mikrometer ( $\mu\text{m}$ ), vilket är detsamma som 100 nanometer (nm), eller en tiotusendel av en millimeter.

### Riktlinjer för god luftkvalitet

I rapporten *Partiklar i inomhusmiljön - en litteraturgenomgång* publicerad 2006 av Socialstyrelsen [9] drog man följande övergripande slutsatser:

- att det finns en påtaglig hälsopåverkan av partiklar
- att kunskapsunderlaget inte är tillräckligt för att sätta ett riktvärde för inomhusmiljön
- att det ur hälsosynpunkt är viktigt att minimera partikelhalterna såväl inomhus som utomhus

Detta kan tolkas som att det finns starka skäl att tillämpa "försiktighetsprincipen" när det gäller hälsoeffekter av luftburna partiklar.

De konkreta riktvärden för god luftkvalitet som trots allt finns är i stort sett helt inriktade på uteluftens kvalitet. Det är exempelvis fallet med de Svenska miljökvalitetsnormerna [10], som bland annat innefattar riktvärden för luftburna partiklar mätt som PM2.5 och PM10. Dessa mått anger massan av partiklar per enhetsvolym luft. Således är PM2.5 massan av partiklar mindre än 2,5  $\mu\text{m}$  och PM10 massan av partiklar mindre än 10  $\mu\text{m}$ . Dessa mått är alltså partiklarnas massa summerad över ett stort partikelstorleksområde. Olika partikelstorleksfördelningar kan således ge samma koncentrationvärde. Eftersom det är stora partiklar som i huvudsak har en betydande massa är PM2.5 och PM10 dåliga mått om man vill studera små partiklar.

Dessvärre tar varken Svensk Standard för provning och klassning av ventilationsfilter, SS EN 779 [11], eller SP's P-märkning av filter [12] någon hänsyn till de minsta partiklarna. Det gör inte heller den nya filterstandard som är under utarbetande - ISO/FDIS 16890 [13]. Den standarden behandlar PM1, PM2.5 och PM10 men det är inte fråga om mätning av masskoncentrationen. Istället handlar det om mätning av antalskoncentration i flera storleksintervall från 0,3  $\mu\text{m}$  och uppåt och en teoretisk beräkning av de olika masskoncentrationsmått.

Enligt Arbetsmiljöverkets föreskrift AFS 2009:2 [14] bör i mer förorenade miljöer, t.ex. "... i stads-kärnor behöver uteluften vanligen filtreras". Vilken filterklass som skulle behövas berörs emellertid inte. På den punkten ger dock riktlinjerna från Energi & Miljötekniska Föreningen [15] rådet att filtereringen bör anordnas med lägst filterklass F7 (enligt SS EN 779).

I Boverkets byggregler [16] finns ett krav att halten av föroreningar i tilluften inte får vara högre än gällande gränsvärden för uteluft. Till kravet hör ett allmänt råd att ren uteluft definieras av miljö-kvalitetsnormerna, som återfinns i luftkvalitetsförordningen (2010:477). I Boverkets byggregler står också att "...kvaliteten på luften som tillförs byggnaden bör säkerställas genom lämplig placering och utformning av uteluftsintag, intagskammare, tilluftsrening eller dylikt". Standarden SS-EN-13779 [17] ger ytterligare vägledning beträffande utformning av ventilationssystem och val av luftfilter.

## Filterklasser och avskiljningsgrad

I Figur 1 visas uppmätt och beräknad avskiljningsgrad för glasfiberfilter av fem klasser, från klass M5 till klass F9. Diagrammet har hämtats från en doktorsavhandling av Bingbing Shi, Chalmers [18]. Uppgifterna i diagrammet kommer från flera olika källor som förefaller vara tämligen samstämmiga. De beräknade kurvorna stämmer ganska väl överens med de uppmätta värdena. I Tabell 1a har avskiljningsgrader för fyra partikelstorlekar sammanställts för de fem filterklasserna. Värdena i Tabellen har lästs av i Figur 1.

Värdena i Figur 1 och Tabell 1a är exempel på avskiljningsgrader för glasfiberfilter av klasserna M5-F9. Vilken avskiljningsgrad filter av en viss klass har kan emellertid variera tämligen mycket från filtermodell till filtermodell. Med andra ord finns det filter som med god marginal uppfyller kriterierna för en viss klass, och det finns filter som nätt och jämnt uppfyller kriterierna. Data i Figur 1 och Tabell 1 kan betraktas som typiska initialvärden för glasfiberfilter.

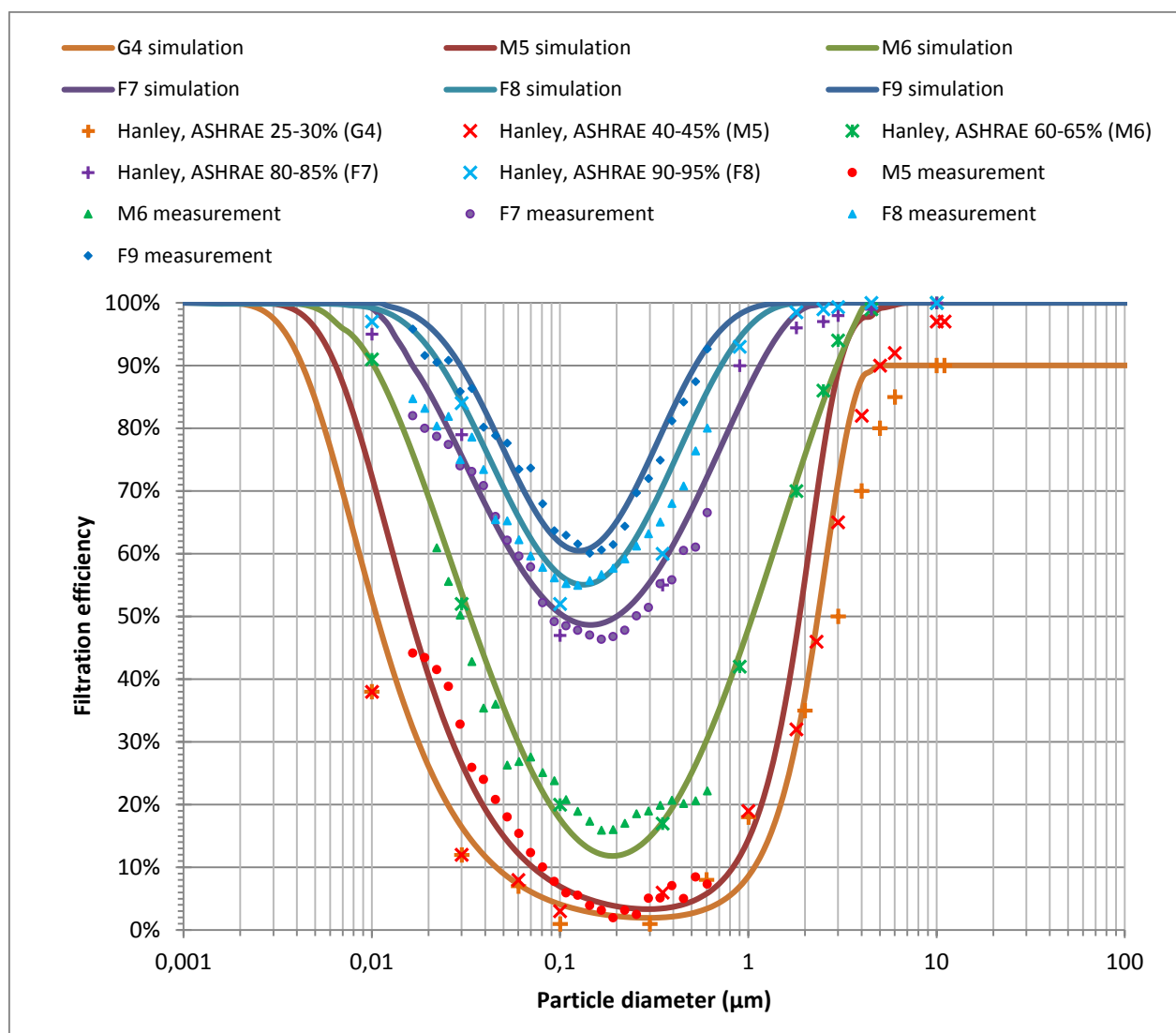
**Tabell 1a.** Sammanställning av avskiljningsgrader för glasfiberfilter av fem olika filterklasser vid fyra olika partikelstorlekar. Data har lästs av i Figur 1.

Filterklass enligt SS EN 779	Partikelstorlek			
	0,4 $\mu\text{m}$	MPPS*	50 nm	20 nm
M5	4 %	2 %	17 %	30 %
M6	20 %	14 %	35 %	63 %
F7	58 %	46 %	62 %	83 %
F8	70 %	55 %	69 %	90 %
F9	81 %	60 %	77 %	94 %

\* MPPS = "Most Penetrating Particle Size" [27], den partikelstorlek som är svårast att filtrera, dvs den partikelstorlek som ger störst penetration. Denna storlek varierar beroende på filtermaterialets struktur och prestanda, lufthastighet genom materialet samt partiklarnas beskaffenhet.

**Tabell 1b.** Ungefärlig överensstämmelse mellan filterklasser enligt SS EN 779 och ISO/FDIS 16890.

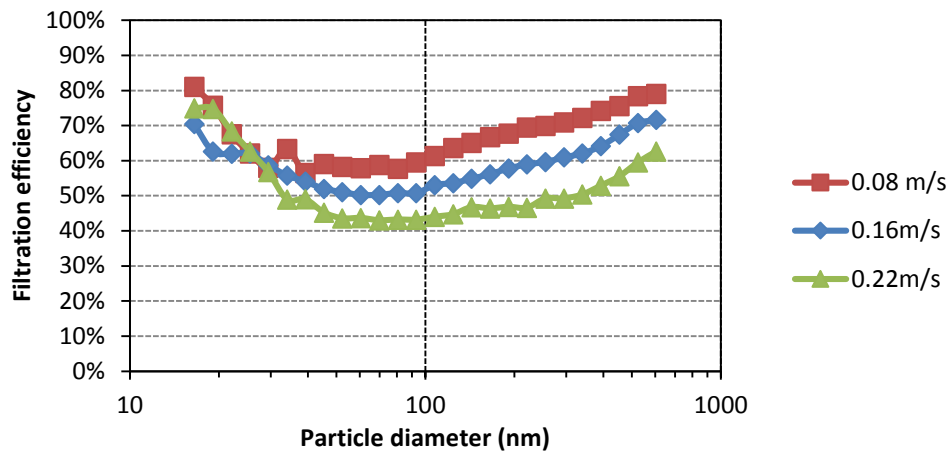
Filterklass	
Enligt SS EN 779 [11]	Enligt ISO/FDIS 16890 [13]
M5	ISO ePM <sub>10</sub> 55 %
M6	ISO ePM <sub>2,5</sub> 50 %
F7	ISO ePM <sub>1</sub> 60 %
F8	ISO ePM <sub>1</sub> 80 %
F9	ISO ePM <sub>1</sub> 85 %



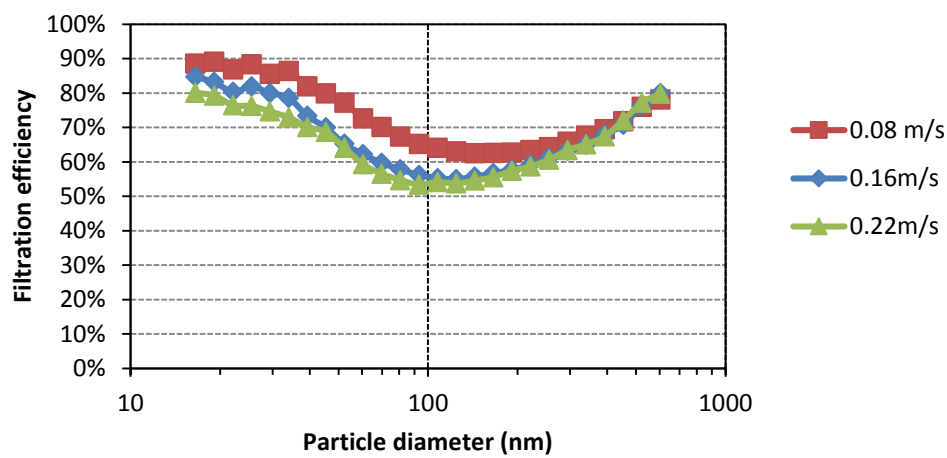
**Figur 1.** Avskiljningsgrad för glasfiberfilter av klass M5-F9. Figuren har hämtats från Shi [18].

Avskiljningsgraden för M5-filter vid  $0,02 \mu\text{m}$  (20 nm) är ca 40 % enligt den mätning som benämns "M5 measurement", men endast ca 20 % enligt mätning av Hanley [26]. Det värde som anges i Tabell 1 är medelvärde av de båda redovisade mätresultaten.

I Figur 2a och 2b visas exempel på avskiljningsgrader för, dels ett nytt syntetiskt elektretfilter (a), dels ett nytt glasfiberfilter. Båda filtren är av klass F8/9. Diagrammen har hämtats från Shi [18]. Som framgår av diagrammen finner vi MPPS för elektretfiltret vid betydligt mindre partikelstorlekar än vad som är fallet för glasfiberfiltret. Ytterligare mätningar som redovisas i Shi [18] bekräftar att detta normalt är fallet. Elektretfiltret i Figur 2 har lägre avskiljningsgrad än glasfiberfiltret vid för s.k. ultrafina partiklar, dvs partiklar mindre än  $0,1 \mu\text{m}$ . Elektretfiltret tycks också vara känsligare för en ökad lufthastighet genom filtermediet.



(a)



(b)

**Figur 2.** Exempel på avskiljningsgrad uppmätt vid olika lufthastigheter genom filtermaterialet, (a) för ett nytt elektrostatiskt laddat syntetfilter, (b) för ett nytt glasfiberfilter. Filterklass F8/9. Data från [18].

## Andra faktorer med påtaglig inverkan på förekomsten av partiklar i inomhusluft

I detta avsnitt behandlas kortfattat följande faktorer:

- Ventilationsflödets storlek
- Effektiv ventilation
- Luftläckage genom byggnadens klimatskal
- Deposition av partiklar inomhus

### Ventilationsflödets storlek

#### *Bostäder*

Boverkets krav på 0,35 l/s per m<sup>2</sup> golv [16] motsvarar ca 0,5 luftomsättningar per timma om takhöjden är 2,4 m. Långt ifrån alla bostäder har ventilation som uppfyller myndigheternas minimikrav. Andra bostäder är betydligt mer välventilerade, t ex i bostäder som anpassats speciellt för allergiker. Ett rimligt intervall för bostadsventilation är 0,3 – 0,7 oms/tim.

#### *Kontor*

Arbetsmiljöverket föreskriver att uteluftsflödet bör vara minst 0,35 l/s per m<sup>2</sup> golv plus 7 l/s per person [14]. Tillämpat på ett cellkontor med 10 m<sup>2</sup> golvarea och 2,7 m takhöjd motsvarar detta 1,4 luftomsättningar per timma. Detta värde kan antas gälla som lägsta erforderliga luftflöde i kontorsbyggnader med vattenburen komfortkyla. I hus med luftburen kyla kommer ventilationsflödet att dimensioneras av kylbehovet. I sådana hus är det inte ovanligt med ventilationsflöden motsvarande runt 3 luftomsättningar per timma. Ett rimligt intervall för ventilation i kontor är 2 – 3 oms/tim.

#### *Skolor*

Som ett räkneexempel kan vi betrakta ett klassrum för 30 elever och en lärare. Om golvarean är 80 m<sup>2</sup> innebär Arbetsmiljöverkets föreskrift [14] att ventilationsflödet behöver vara åtminstone 245 l/s. Om takhöjden är 2,7 m motsvarar detta 4,1 luftomsättningar per timma. För att säkerställa att myndigheternas råd beträffande inomhusluftens koldioxidkoncentration [14] ansätter man ofta att det behövs ca 10 l/s per person. I klassrum med liten golvarea per person kan detta motsvara upp emot 6,0 luftomsättningar per timma. Ett rimligt intervall för ventilation i klassrum är 4 – 6 oms/tim.

### Effektiv ventilation

Om det råder kortslutning mellan tilluft och frånluft når inte all ventilationsluft vistelsezonen. En del av den rena tilluften transporteras ut med frånluften direkt. Detta kan studeras och beräkningsmässigt hanteras med ett index som kallas "lokalt ventilationsindex", se Nordtestmetod NT VVS 114 [19]. Enligt Boverkets byggregler bör det lokala ventilationsindexet inte underskrida värdet 90 %. Innebörden av detta är att minst 90 % av tilluften ska nå vistelsezonen och kunna användas för att transportera bort luftföroreningar.



## Luftläckage genom klimatskalet

Krav på byggnaders täthet ställs vanligen som ett maximalt tillåtet läckageflöde per m<sup>2</sup> av byggnadens totala omslutningsarea, vid 50 Pa tryckskillnad över klimatskalet. Hur omräkning mellan olika tryckskillnader kan gå till berörs exempelvis i en SP-rapport av Sikander och Wahlgren [20]. Ett praktiskt beräkningshjälpmedel för omräkning till normala driftförhållanden återfinns i datorprogrammet BV2 – Byggnadens värmebalans i varaktighetsdiagram, version 2012 [21]. Den programvaran tar hänsyn dels till vindtryck, dels till den termiska drivkraft som uppstår vid olika temperatur inne och ute.

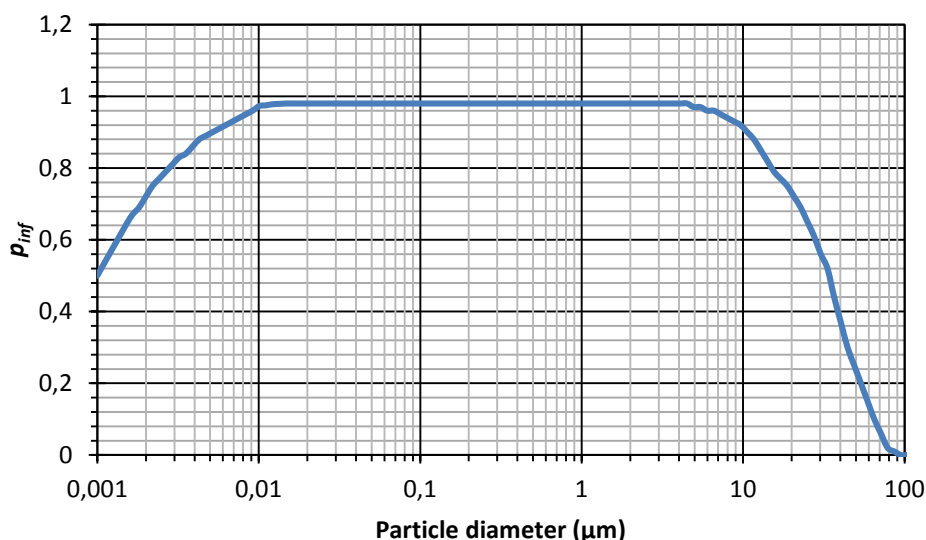
**Tabell 2.** Omräkning från läckage vid provtryckning till verklig drift. Beräkningen gäller under antagande att temperaturdifferensen inne-ute är 10 grader C och att vindtrycket uppgår till 5 Pa. Beräkningen har gjorts med programvaran BV2 – Byggnadens värmebalans i varaktighetsdiagram, version 2012 [21].

Läckage vid 50 Pa (l/s per m <sup>2</sup> )	Luftomsättning vid normal drift (luftomsättningar per timma)	
	Beroende på vindtryck	Beroende på vind och termisk effekt
0,3	0,08	0,09
0,6	0,16	0,19
0,8	0,21	0,25
1,6	0,41	0,51

Boverkets byggregler från 1994 angav 0,8 l/s per m<sup>2</sup> för bostäder och 1,6 l/s per m<sup>2</sup> för lokaler. Idag innehåller byggreglerna endast ett alternativt krav på max 0,6 l/s per m<sup>2</sup> för bostäder. Krav i samband med lågenergihus är idag vanligen 0,3 l/s per m<sup>2</sup>, vid 50 Pa.

Med ledning av ovanstående konstateras att täta byggnader kan antas ha luftläckage motsvarande ca 0,1 omsättningar per timma. Ibland redovisas ännu lägre värden på luftomsättning till följd av läckage, men då har omräkningen från läckflöde vid 50 Pa till luftomsättning vid normal drift gjorts schablonmässigt [22]. Otäta byggnader kan ha över 0,3 omsättningar per timma.

Luften som läcker genom klimatskärmen är i praktiken ofiltrerad när den når rummet. Ett exempel på att en viss filtrering dock sker, speciellt för mycket små och mycket stora partiklar, visas i Figur 3. Enligt figuren är penetrationen 0,98 för alla partikelstorlekar mellan 10 nm och 3 á 4 µm.

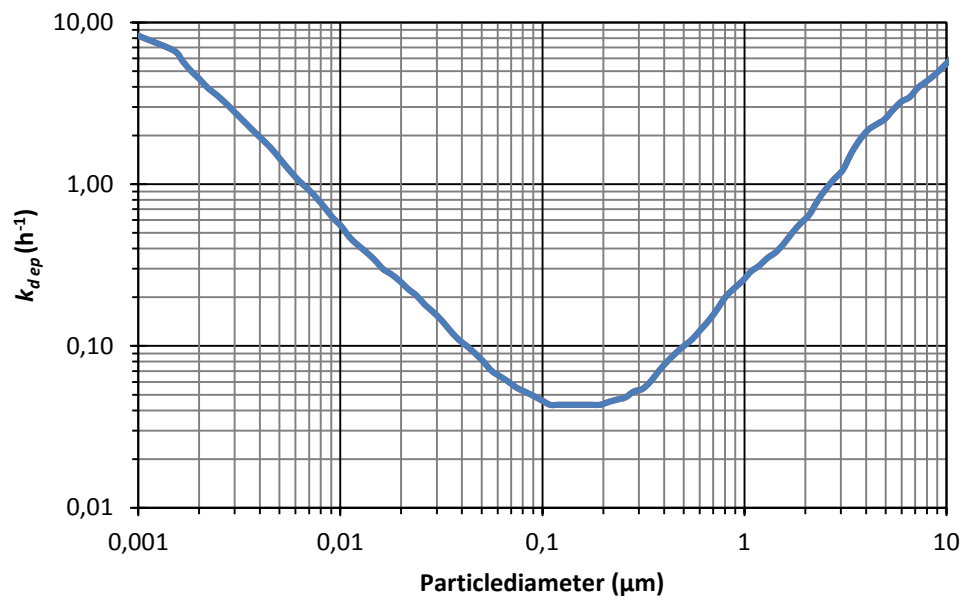


**Figur 3.** Penetration genom otätt byggnadsskal ( $p_{inf}$ ) som funktion av partikeldiameter. Diagrammet har hämtats från Liu och Nazaroff, 2001 [23]. Data gäller för ett byggnadsskal med jämnt fördelade sprickor med höjden 0,05-2,0 mm och längden 3 cm. Tryckdifferensen över konstruktionen är satt till 4 Pa.

### Deposition av partiklar inne

Figur 4 visar ett exempel på hur depositionen av partiklar på ytor inomhus kan variera med varierande partikelstorlek. Depositionshastigheten har angivits "per timma" vilket är en enhet ekvivalent med antalet luftomsättningar per timma. I tabellen nedan anges depositionshastigheterna för några givna partikelstorlekar. Värdena har lästs av i Figur 4. Observera att de angivna värdena är exempel från litteraturen. Andra referenser anger högre värden. Enligt [28] kan depositionshastigheten variera med över en tiopotens för en och samma partikelstorlek. Det förekommer uppgifter om att  $k_{dep}$  för exempelvis partiklar av storleken 0,4  $\mu m$  skulle kunna anta värden över  $1 h^{-1}$ .

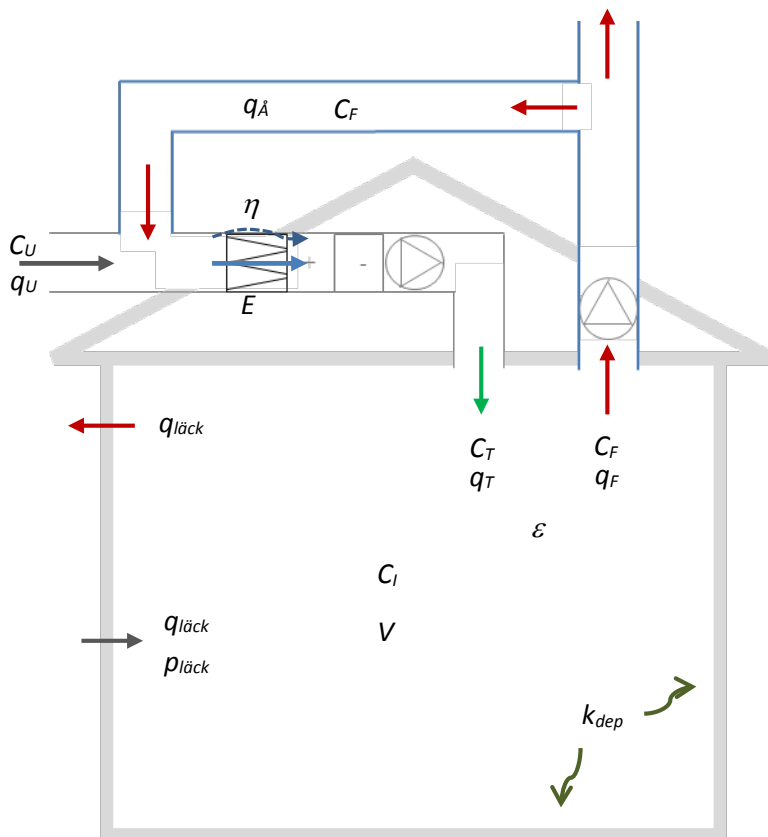
Partikeldiameter	$k_{dep}$
0,4 $\mu m$	0,08 $h^{-1}$
0,1-0,2 (MPPS)	0,04 $h^{-1}$
50 nm	0,08 $h^{-1}$
20 nm	0,25 $h^{-1}$



**Figur 4.** Depositionshastighet ( $k_d$ ) som funktion av partikeldiameter. Diagrammet har hämtats från Riley et al., 2002 [24].

## Beräkningsmodell

Figur 5 visar en skiss av ett hus ventilerat med mekanisk till- och frånluft. De faktorer som påverkar partikelkoncentrationen inomhus enligt föregående avsnitt har markerats i figuren. Modellen tar dessutom hänsyn till att en del av frånluften kan föras tillbaks till rummet genom att den blandas med uteluftsflödet före tilluftsfiltret. Partikelkällor inomhus har inte tagits med i modellen.



$C_I$  = koncentration inne [partiklar/m<sup>3</sup>]

$C_U$  = koncentration ute [partiklar/m<sup>3</sup>]

$C_T$  = koncentration i tilluft [partiklar/m<sup>3</sup>]

$C_F$  = koncentration i frånluft [partiklar/m<sup>3</sup>]

$\varepsilon$  = lokalt ventilationsindex [-]

$q_T$  = tilluftsflöde [m<sup>3</sup>/h]

$q_F$  = frånluftsflöde [m<sup>3</sup>/h]

$q_U$  = uteluftsflöde [m<sup>3</sup>/h]

$q_{\text{Å}}$  = återluftsflöde [m<sup>3</sup>/h]

$q_{\text{läck}}$  = läckage genom klimatskärmen [m<sup>3</sup>/h]

$p_{\text{läck}}$  = partikelpenetration genom klimatskärmen [-]

$E$  = filtereffektivitet (avskiljningsgrad) [-]

$\eta$  = andel av luftflödet som passerar filtermediet [-]

$k_{\text{dep}}$  = partikeldeposition inne [h<sup>-1</sup>]

$V$  = rumsvolym [m<sup>3</sup>]

**Figur 5.** Skiss av ventilerat hus med mekanisk till- och frånluftventilation där en del av frånluftsflödet kan återcirkuleras och blandas med uteluftsflödet före tilluftsfiltret.

Om förhållandena inte varierar i tiden och koncentrationen i inomhusluften är konstant säger man att det råder koncentrationsjämvikt. Då är den tillförda mängden partiklar lika stor som den bortförda. En balansekvation kan ställas upp och efter "hyfsning" kan ekvation (1) härledas.

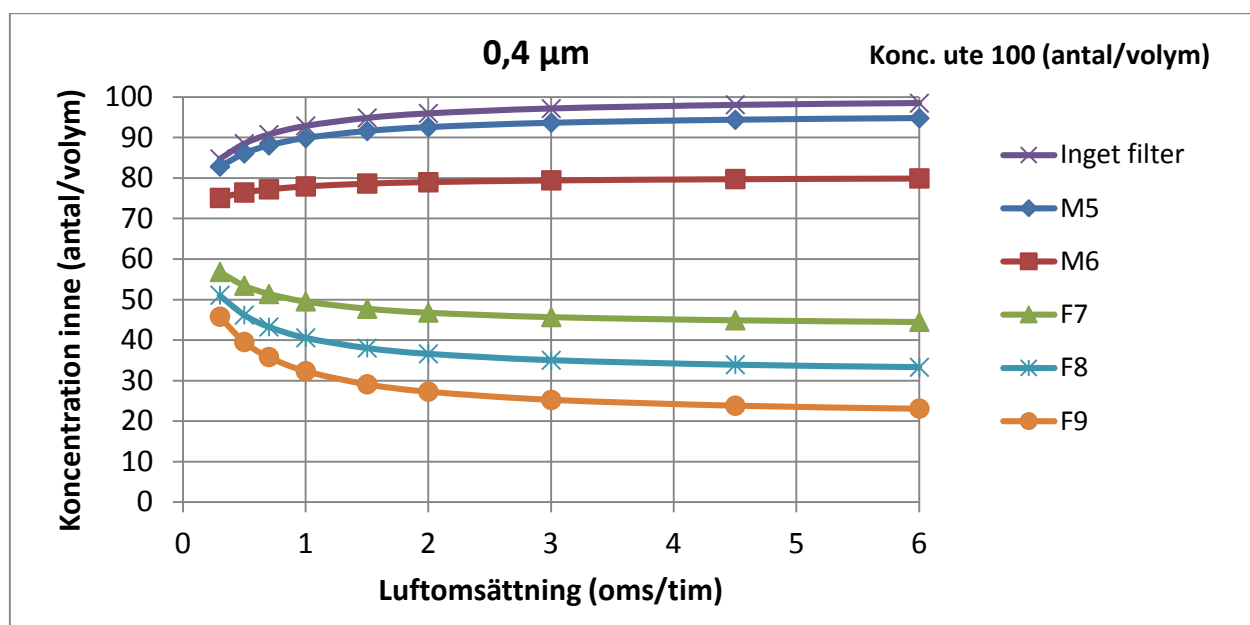
$$C_I = C_U \frac{(1 - \eta \cdot E) \varepsilon \cdot q_U + p_{läck} \cdot q_{läck}}{\varepsilon (q_U + q_{\dot{\lambda}}) + q_{läck} + k_{dep} \cdot V - (1 - \eta \cdot E) \varepsilon \cdot q_{\dot{\lambda}}} \quad (1)$$

Ekvation (1) kan användas för att beräkna koncentrationen i inomhusluften av partiklar som tillförs utifrån. Ekvationen gäller när det råder koncentrationsjämvikt. Som framgår av Figur 5 gäller modellen under förutsättning att tilluften filtreras med en enda filterbank. Således passerar blandningen av uteluftsflödet och återluftsflödet samma filterbank. Beräkningsresultatet blir detsamma för ett system där uteluftsflödet filtreras i en filterbank och frånluftsflödet i en annan, så länge de båda filterbankarna har filter med samma avskiljningsgrad. Fall utan återluft kan beräknas genom att sätta återluftsflödet till noll i ekvation (1).

## Resultat

I Figur 6 redovisas beräkningsresultat för partiklar av storleken 0,4  $\mu\text{m}$ . Anledningen till att just 0,4  $\mu\text{m}$  redovisas här är att detta kan betraktas som en referensstorlek; filter klassificeras för 0,4  $\mu\text{m}$  partiklar enligt SS EN 779 [11], SP's P-märkning [12] innefattar kriterier för 0,4  $\mu\text{m}$  partiklar och det är just denna partikelstorlek det finns mest data och erfarenhetsvärden för. Motsvarande data för andra partikelstorlekar redovisas i Bilaga 1-3. Samtliga resultat som redovisas i detta kapitel avser fall utan återluft, d v s tilluftsflödet består till 100 % av filtrerad eller ofiltrerad uteluft. Resultat för några fall med återluft redovisas i Bilaga 5.

Diagrammet visar hur partikelkoncentrationen i inomhusluften varierar med storleken på ventilationsflödet uttryckt som antalet luftomsättningar per timma. Koncentrationen är angiven som antal partiklar per volym luft och värdena gäller under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Detta innebär att värdena i diagrammet speglar hur hög koncentrationen blir inne i procent av koncentrationen i utomhusluften.



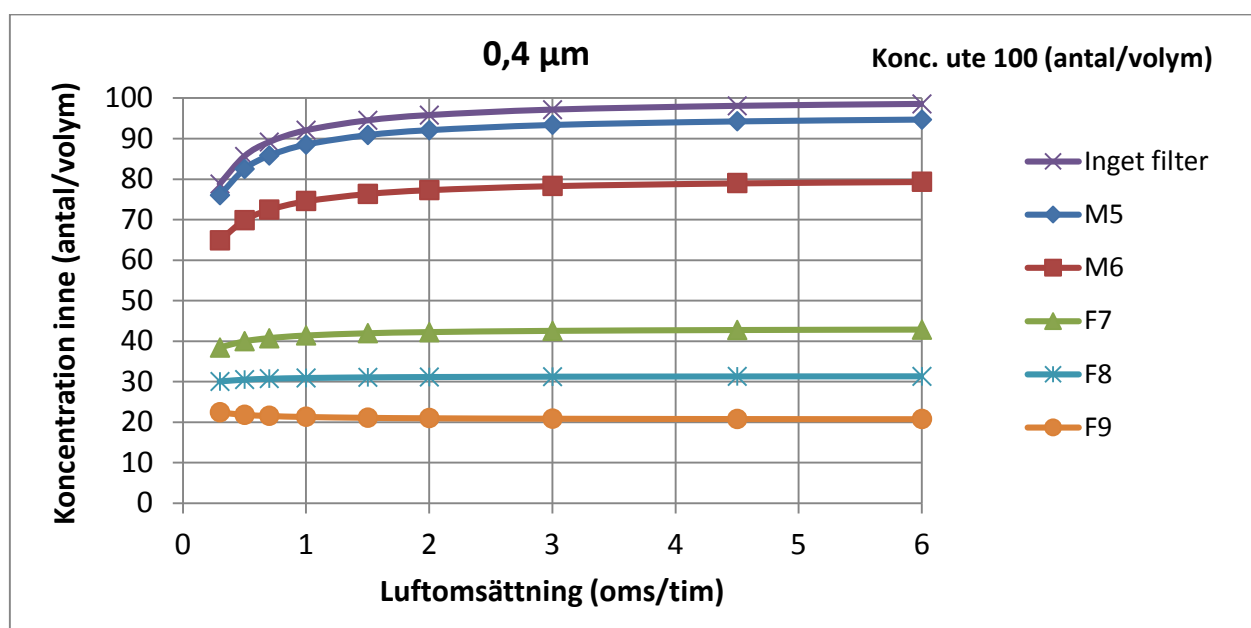
**Figur 6.** Inomhusluftens koncentration av 0,4  $\mu\text{m}$  stora partiklar beräknad under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Luftläckaget genom byggnadsskalet har satts till 0,2 luftomsättningar per timma och 2 % av uteluftsflödet antas läcka förbi filtret utan att renas. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.

Figur 6 visar att det för 0,4  $\mu\text{m}$  stora partiklar är marginell skillnad mellan filtrering med filter av klass M5 jämfört med ett fall helt utan filter. Filtrering med klass M6 leder till att partikelkoncentrationen inne blir 75 %-80 % av koncentrationen ute, beroende på luftväxlingens storlek. Med filter av klass F7 blir koncentrationen inne ca 45 % av koncentrationen ute vid fall då luftväxlingen överstiger ca 2 luftomsättningar per timma. Med filter av klass F9 blir motsvarande värde ca 25 %. Med filterklass F7-F9 ökar koncentrationen inne markant när luftomsättningen minskas under ett par luftomsättningar per timma.

Enligt Figur 6 är det en principiell skillnad mellan filterklass M6 och lägre å ena sidan och filterklass F7 och högre å den andra. Med filter av låg klass ökar koncentrationen inomhus när luftomsättningen ökar. Med filter av hög klass är förhållandet det omvända; alltså att koncentrationen inne minskar

med ökande luftomsättning. I båda fallen beror detta på att filtrets avskiljningsgrad får allt större betydelse, ju högre det filtrerade luftflödet är. Om det filtrerade luftflödet istället är nära noll kommer endast infiltrationen av ofiltrerad luft och depositionen inne att inverka på hur hög koncentrationen i inomhusluften blir. Om det filtrerade flödet skulle vara noll blir koncentrationen inne ett resultat av balansen mellan den mängd partiklar som tillförs via läckage genom byggnadsskalet och den mängd som bortförs genom deposition. Med data enligt Figur 1 ( $k_d=0,08 \text{ h}^{-1}$  och  $q_{\text{läck}}/V=0,2 \text{ oms/tim}$ ) blir koncentrationen inne 70 % av den ute om det filtrerade luftflödet skulle minskas till noll. Om det filtrerade luftflödet ökar kommer koncentrationen inne att förändras mot ett värde som bestäms av den andel partiklar som passerar filtret, d v s ett minus avskiljningsgraden ( $1-E_F$ ). Med exempelvis ett filter av klass M6 blir det värdet 80 % eftersom filtrets avskiljningsgrad satts till 20 %. Detta innebär att med filterklass M5 ökar koncentrationen inne med ökande ventilationsflöde, precis som Figur 6 visar. Om man istället använder filter av klass F7 kommer koncentrationen att förändras mot värdet 42 % eftersom avskiljningsgraden har satts till 58 %. I det fallet minskar alltså koncentrationen, så som Figur 6 visar.

Motsvarande beräkning för en mycket tät byggnad, med en infiltration motsvarande  $0,03 \text{ h}^{-1}$ , visar att koncentrationen inne blir ca 25 % av den ute när ventilationsflödet minskas mot noll. I det fallet kommer koncentrationen inne att öka när luftflödet ökas, även för filterklass F7 och F8, se Figur 7.



**Figur 7.** Inomhusluftens koncentration av  $0,4 \mu\text{m}$  stora partiklar beräknad under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Beräkningen avser en mycket tät byggnad. Luftläckaget genom byggnadsskalet har satts till  $0,03$  luftomsättningar per timma och 2 % av uteluftsflödet antas läcka förbi filtret utan att renas. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.

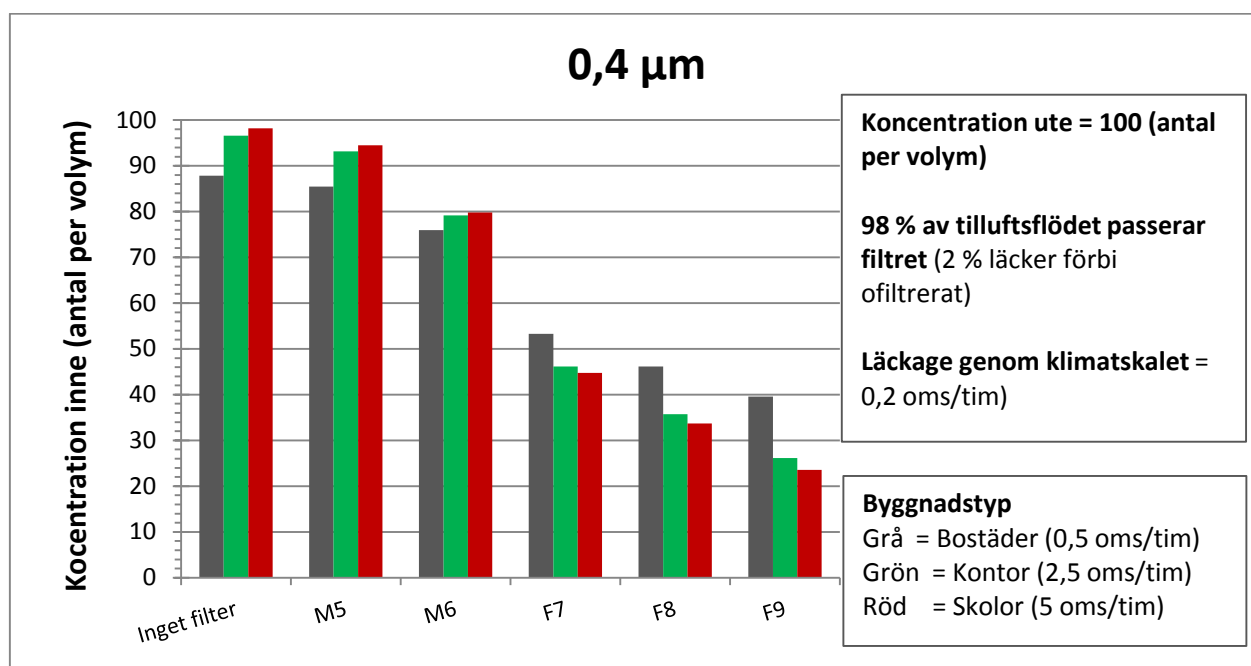
Av ovanstående analys framgår att filtrets avskiljningsgrad får större betydelse ju större det filtrerade ventilationsflödet är och ju mindre inläckaget av ofiltrerad luft är. Slutsatsen av detta är uppenbar;

ett effektivt filter har bättre förutsättningar att bidra till ett lågt partikelinnehåll i inomhusluften i täta byggnader med högt ventilationsflöde jämfört med otäta byggnader med lågt ventilationsflöde.

### Olika typer av byggnader

I Figur 8 visas resultatet av beräkningar gjorda för glasfiberfilter i bostäder, kontor och skolor när det gäller partiklar av storleken  $0,4 \mu\text{m}$ . Figuren visar att koncentrationen inne blir mellan 88 % och 98 % av koncentrationen ute om luften inte filtreras alls. Att det blir lägre koncentration inne än ute beror på att partiklar deponeras på ytor inomhus. Figuren visar också att filter av klass M5 medför en försumbar sänkning av koncentrationen av den aktuella partikelstorleken. Filterklass M6 ger en viss förbättring medan koncentrationen blir markant först om man byter till filterklass F7 eller högre. Med filter av klass F7 beräknas koncentrationen i bostäder bli lite drygt 50 % av den i uteluften. I kontor och skolor minskar koncentrationen till ca 45 %. Med filterklass F9 beräknas koncentrationen bli knappt 40 % i bostäder och runt 25 % i kontor och skolor.

Motsvarande diagram för andra partikelstorlekar visas i Bilaga 1. Där framgår bland annat att koncentrationen av ultrafina partiklar av storleken 20 nm kan reduceras till ca 40 % av koncentrationen ute om man använder glasfiberfilter av klass M6 (oavsett vilken av de tre byggnadstyperna man betraktar). Med glasfiberfilter av klass F7 beräknas koncentrationen av 20 nm partiklar i bostäder bli ca 30 % av koncentrationen ute. För kontor och skolor blir motsvarande resultat ner mot 20 %. Filter av klass F9 beräknas bidra till att få ner koncentrationen (20 nm) till ca 25 % i bostäder och ner mot 10-15 % i kontor och skolor.



**Figur 8.** Inomhusluftens koncentration av  $0,4 \mu\text{m}$  stora partiklar beräknad under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Data redovisas för bostäder (0,5 oms/tim), kontor (2,5 oms/tim) och skolor (5 oms/tim). Luftläckaget genom byggnadsskalet har satts till 0,2 luftomsättningar per timma för alla tre byggnadstyperna, och 2 % av uteluftsflödet antas läcka förbi filtret utan att renas. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.

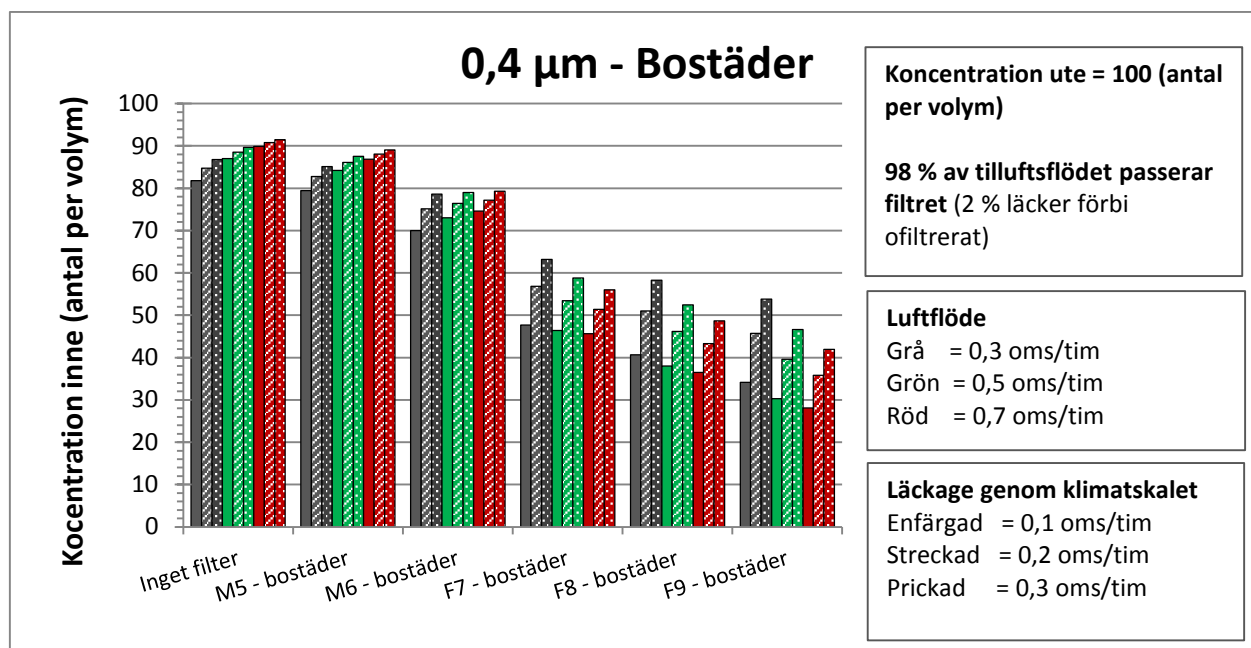


## Beräkningar för byggnader med olika ventilationsflöde och olika täthet

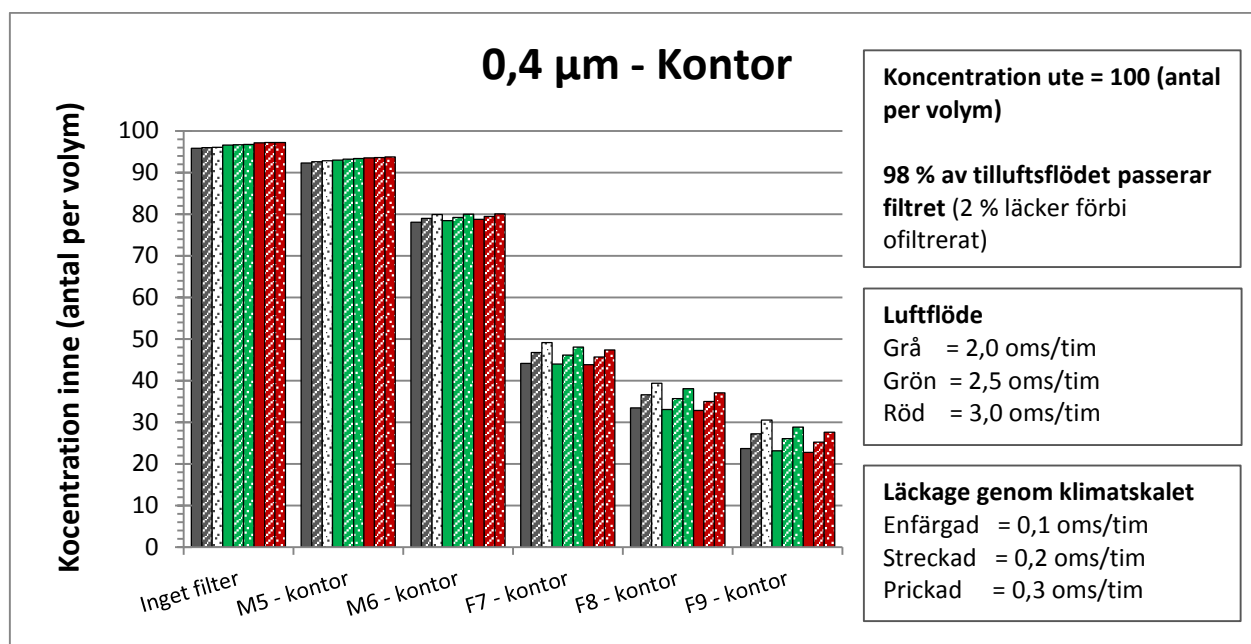
Partikelmätningar i olika byggnader kan ge tämligen olika resultat och det kan vara svårt att göra generaliseringar. Två viktiga anledningar till att det blir olika resultat är att olika byggnader ventileras olika mycket och att de har olika täthet. För att illustrera detta har beräkningar gjorts för de tre byggnadskategorierna med varierande antaganden om luftomsättning och läckage genom byggnadsskalet. I Figur 9a visas resultatet från beräkningar 0,4 µm partiklar i för bostäder. I Figur 9b och 9c visas motsvarande resultat för kontor respektive skolor. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.

Figurerna visar att en betydligt större spridning av partikelkoncentrationen kan förväntas mellan olika bostäder än mellan kontor respektive skolor. Detta beror på att det filtrerade luftflödet är tämligen lågt i bostäder, vilket innebär att läckaget genom byggnadsskalet får stor betydelse. Figur 9a visar att i bostäder som filtreras med glasfiberfilter av klass F7-F9 kan inomhuskoncentrationen ändras 10-20 procentenheter när luftläckaget varierar mellan motsvarande 0,1 och 0,3 oms/tim. I kontor beräknas motsvarande koncentrationsändring bli mindre än 10 procentenheter, se Figur 9b, och i skolor 5 procentenheter, se Figur 9c.

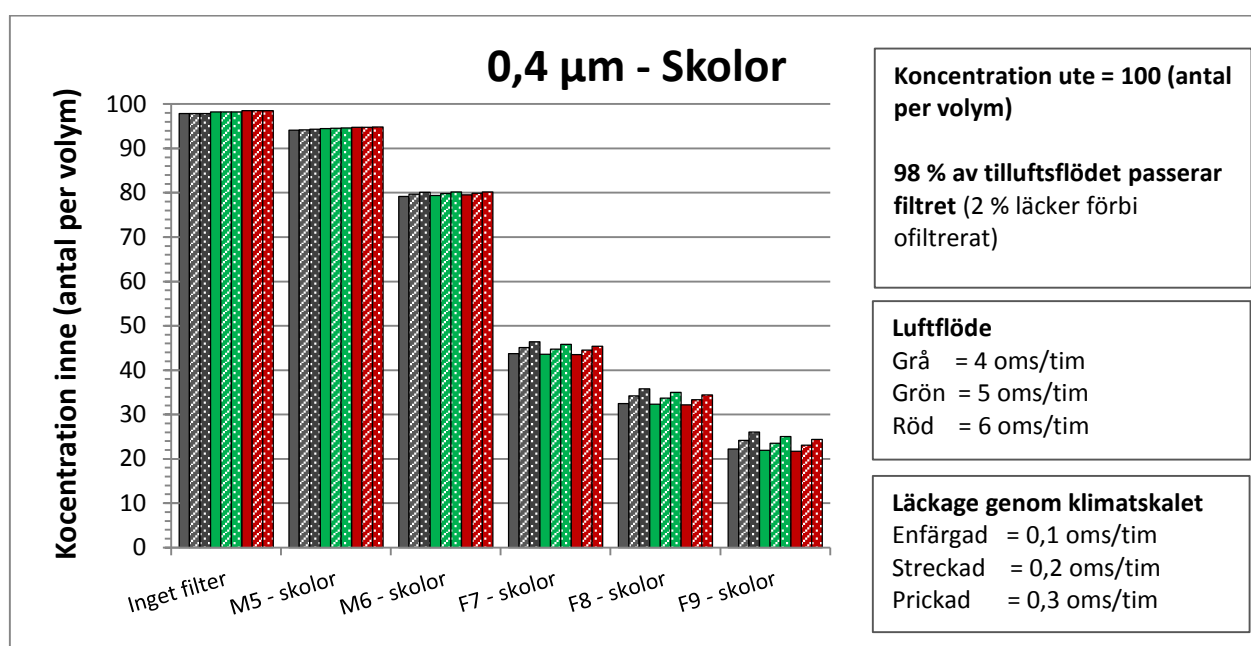
Motsvarande resultat för andra partikelstorlekar visas i Bilaga 2.



**Figur 9a.** Partikelkoncentrationer i bostäder beräknade för ventilationsflöden motsvarande 0,3 till 0,7 luftomsättningar per timma och för olika storlek på luftläckaget genom klimatskalet (mellan 0,1 och 0,3 luftomsättningar per timma). Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.



**Figur 9b.** Partikelkoncentrationer i kontor beräknade för ventilationsflöden motsvarande 2 till 3 luftomsättningar per timma och för olika storlek på luftläckaget genom klimatskalet (mellan 0,1 och 0,3 luftomsättningar per timma). Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.



**Figur 9c.** Partikelkoncentrationer i skolor beräknade för ventilationsflöden motsvarande 4 till 6 luftomsättningar per timma och för olika storlek på luftläckaget genom klimatskalet (mellan 0,1 och 0,3 luftomsättningar per timma). Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt föregående kapitel.

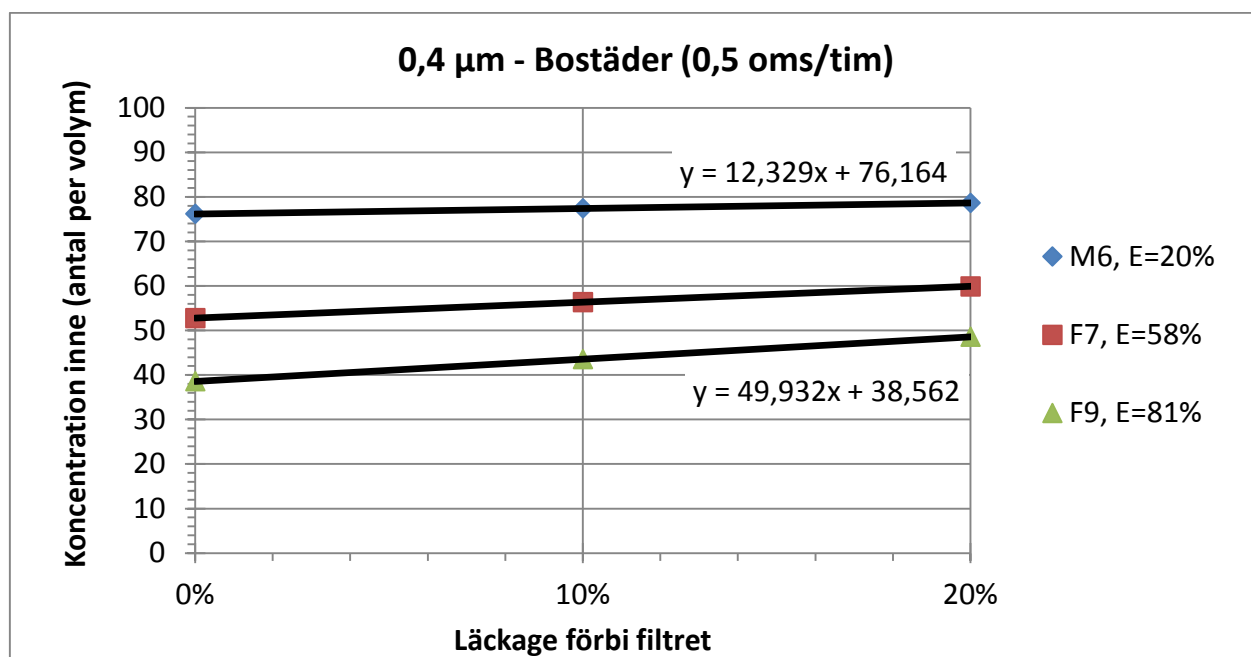
## Läckage förbi filtret

Luft kan läcka förbi filtret vilket leder till att en del av tilluftsflödet inte filtreras. Det här är ett litet eller försumbart problem så länge filterinstallationen är korrekt utförd, med tätningslister monterade på rätt sätt. I standarden SS-EN 1886:2007 [25] anges maximalt tillåtet läckage (by-pass leakage) i procent av det nominella luftflödet i aggregatet, se Tabell 3.

**Tabell 3.** Maximalt tillåtet luftläckage (bypass leakage) vid ett provtryck på 400 Pa.

Filterklass	G1 – M5	M6	F7	F8	F9
Maximalt läckage	6 %	4 %	2 %	1 %	0,5 %

I Figur 10 återges inomhusluftens koncentration av 0,4µm partiklar beräknad för varierade storlek på läckaget. Figuren avser bostäder. Regressionslinjer visas för fall med glasfiberfilter av klass M6, F7 och F9. För varje procentenhet läckaget ökar förbi ett M6 filter kommer koncentrationen inne att öka med ca 0,15 procent. För filterklass F9 blir resultatet att för varje procentenhet läckaget ökar kommer koncentrationen inne att öka med ca 1 %. Motsvarande beräkning för skolor med filter av klass F9 ger att koncentrationen inne ökar med ca 3 % för varje procentenhet läckaget ökar genom filtret. Resultat för andra byggnadstyper och för olika partikelstorlekar redovisas i Bilaga 3.



**Figur 10.** Koncentration av 0,4µm partiklar i bostäder beräknad som funktion av läckaget förbi filtret.

## Sammanfattning och slutsatser

Beräkningsresultatet sammanställts i Tabell 4-6. Det är tydligt att partikelkoncentrationerna blir högre i en otät byggnad med lågt ventilationsflöde jämfört med en tät välventilerad byggnad. Därför är redovisningen i tabellerna uppdelad just på dessa två byggnadskategorier. Sammanfattningsvis ger de redovisade beräkningarna följande indikationer beträffande ventilationsfilters förmåga att reducera inomhusluftens koncentration av partiklar med ursprung utomhus:

- Skillnaden mellan olika filterklassers luftreningseffekt är mindre i bostäder än i kontor och skolor. Detta beror på att infiltration av uteluft och deposition på ytor får större inverkan ju lägre det filtrerade ventilationsflödet är.
- De studerade glasfiberfiltren av klass M5 medför försumbar reduktion av inomhusluftens koncentration av partiklar av storlekarna 0,4µm och MPPPS, men kan förväntas reducera koncentrationen av 20nm partiklar med 15-25 % i bostäder och uppåt 30 % i kontor och skolor, jämfört med fallet helt utan filter.
- Glasfiberfiltren av klass M6 medför endast liten reduktion av inomhusluftens koncentration av partiklar av storlekarna 0,4µm och MPPPS, men kan förväntas reducera koncentrationen av 20 nm partiklar med ca 30 % i otäta bostäder med låga ventilationsflöden och uppåt 60 % i täta och välventilerade skolor, jämfört med fallet helt utan filter.
- Glasfiberfiltren av klass F7-F9 medför avsevärt större reduktion av inomhusluftens koncentration av samtliga studerade partikelstorlekar jämfört med de lägre filterklasserna.
- Glasfiberfilter av klass F7 kan i bostäder reducera koncentrationen av ultrafina partiklar av storleken 20 nm med 40-70 %, jämfört med fallet utan filter. Den under gränsen avser otäta byggnader med låga ventilationsflöden. Byte från filterklass F7 till F8 eller F9 reducerar koncentrationen ytterligare men med en mindre magnitud jämfört med fallet av byte från M6 till F7.
- Glasfiberfilter av klass F7 kan i kontor och skolor reducera koncentrationen av ultrafina partiklar av storleken 20 nm med 70-80 %, jämfört med fallet utan filter. Byte från filterklass F7 till F9 skulle kunna medföra ytterligare nära en halvering av koncentrationen.
- Glasfiberfilter av klass F9 kan i kontor och skolor reducera koncentrationen av ultrafina partiklar av storleken 20 nm med 80-90 %, jämfört med fallet utan filter.

**Tabell 4.** Sammanfattning av beräkningsresultatet för partiklar av storleken 0,4 µm. Procentsatserna anger filtrets reduktion av inomhusluftens partikelkoncentration jämfört med motsvarande fall utan filter.

Fall		M5	M6	F7	F8	F9
Bostad	Otät med lågt ventilationsflöde	2 %	9 %	27 %	33 %	38 %
	Tät och välventilerad	3 %	17 %	49 %	59 %	69 %
Kontor	Otät med lågt ventilationsflöde	3 %	17 %	49 %	59 %	68 %
	Tät och välventilerad	4 %	19 %	55 %	66 %	77 %
Skola	Otät med lågt ventilationsflöde	4 %	18 %	53 %	63 %	73 %
	Tät och välventilerad	4 %	19 %	56 %	67 %	78 %

**Tabell 5.** Sammanfattning av beräkningsresultatet för MPPS (Most Penetrating Particle Size). Procentsatserna anger filtrets reduktion av inomhusluftens partikelkoncentration jämfört med motsvarande fall utan filter.

Fall		M5	M6	F7	F8	F9
Bostad	Otät med lågt ventilationsflöde	1 %	2 %	22 %	26 %	28 %
	Tät och välventilerad	2 %	12 %	39 %	47 %	51 %
Kontor	Otät med lågt ventilationsflöde	2 %	12 %	39 %	46 %	51 %
	Tät och välventilerad	2 %	13 %	44 %	52 %	57 %
Skola	Otät med lågt ventilationsflöde	2 %	13 %	42 %	50 %	54 %
	Tät och välventilerad	2 %	13 %	44 %	53 %	58 %

**Tabell 6.** Sammanfattning av beräkningsresultatet för partiklar av storleken 20 nm. Procentsatserna anger filtrets reduktion av inomhusluftens partikelkoncentration jämfört med motsvarande fall utan filter.

Fall		M5	M6	F7	F8	F9
Bostad	Otät med lågt ventilationsflöde	14 %	30 %	39 %	42 %	44 %
	Tät och välventilerad	25 %	53 %	70 %	76 %	80 %
Kontor	Otät med lågt ventilationsflöde	25 %	53 %	70 %	76 %	79 %
	Tät och välventilerad	28 %	60 %	78 %	85 %	89 %
Skola	Otät med lågt ventilationsflöde	27 %	57 %	75 %	82 %	85 %
	Tät och välventilerad	29 %	61 %	80 %	87 %	90 %

Notera att resultaten gäller filter med de avskiljningsgrader som redovisas i rapporten. Data härrör från provningar av glasfiberfilter. Rimligtvis skulle det bli någorlunda likartade resultat med data för andra glasfiberfilter som godkänts både vid provning enligt SS EN 779 och långtidsprovning i samband med SPs P-märkning av filter.

Beräkningarna avser således inte andra typer av filter, såsom elektrostatiskt laddade syntetfilter (elektretfilter). Som illustreras i Figur 2 har sådana filter en annan form på "avskiljningsgradskurvan". Bland annat ligger MPPS vid mindre partikelstorlek – inom det ultrafina storleksområdet. Om filtret förlorar sin elektrostatiska laddning är risken stor att det inte klarar kraven för SPs P-märkning när det gäller 0,4 µm stora partiklar. Det är högst oklart hur sådana filter fungerar för ultrafina partiklar. Det saknas idag möjlighet att med hjälp av gällande och nära förestående standarder kvalitetssäkra valet av filter för dessa partiklar.

I Bilaga 4 redovisas laboratoriemätningar genomförda i en testkammare i full skala. Vid mätningarna studerades partikelkoncentrationen inne i testkammaren i förhållande till koncentrationen utanför vid olika ventilationsflöden, luftläckage och filterkvaliteter. Resultatet redovisas som koncentration i

testkammaren i procent av koncentrationen utanför. Skillnaden mellan uppmätt och beräknat resultat skilde som mest 7 procentenheter. Det var alltså god överensstämmelse mellan mätningarna och beräkningarna.

Det krävs experimentella undersökningar i fält för att studera det aktuella problemet vidare, d v s för att klarlägga vilket skydd filter av olika kvaliteter och klasser ger mot exponering av luftburna partiklar i olika typer av byggnader. Resultaten som redovisas i denna rapport torde utgöra ett bra underlag för planering av sådana mätningar.

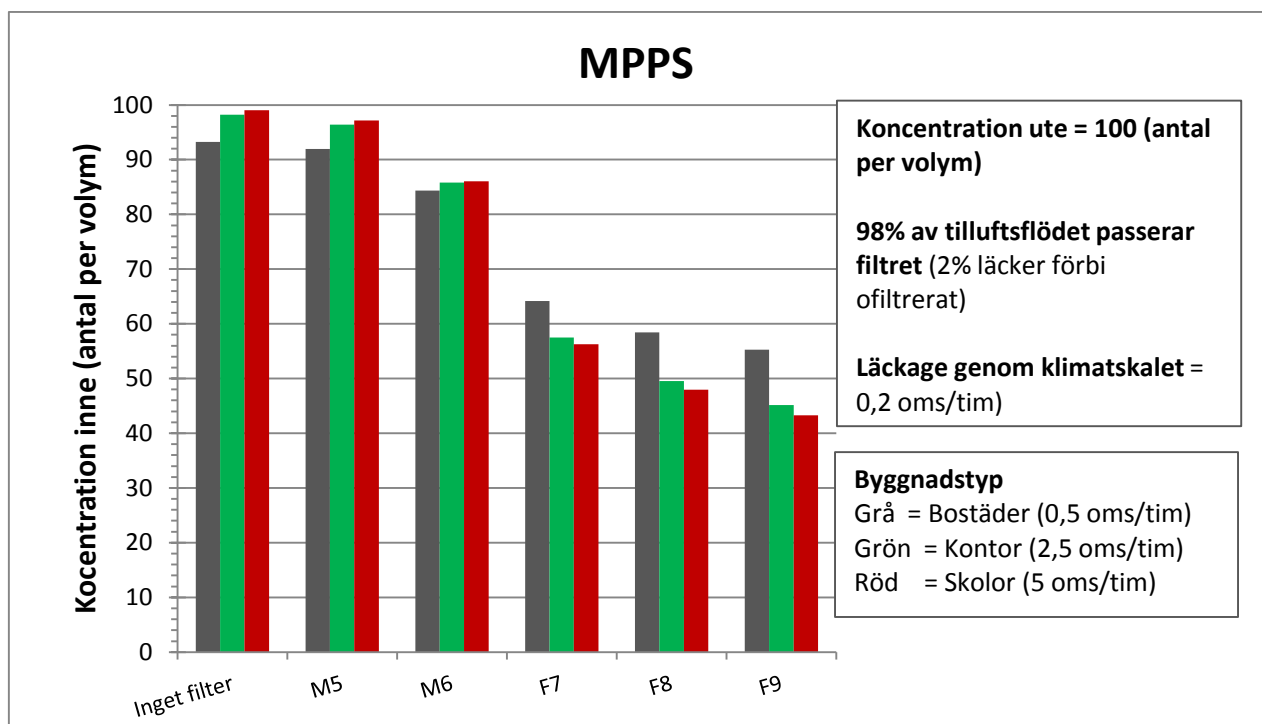
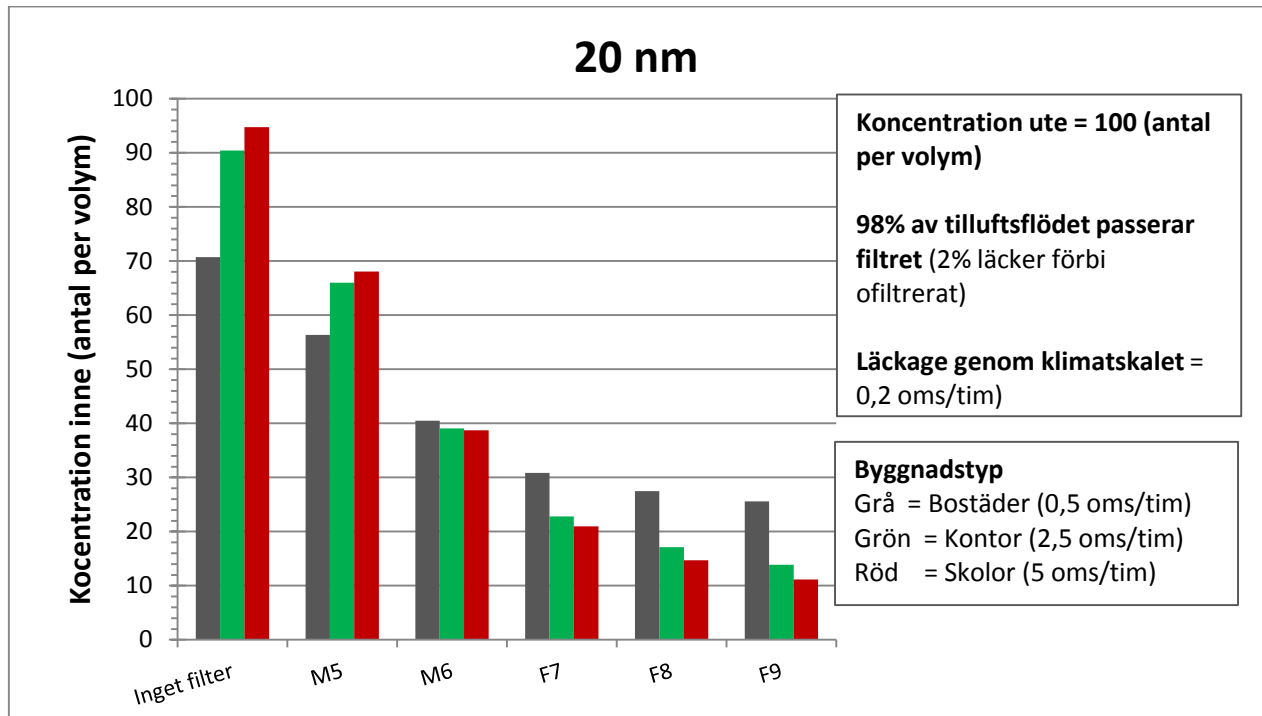
## Litteratur

- 1a. Stölzel, M., Breitner, S., Cyrys, J., Pitz, M., Wolke, G., Kreyling, W., Heinrich, J., Wichmann, H.E., Peters, A., 2007. Daily mortality and particulate matter in different size classes in Erfurt, Germany. *J Expo Sci Environ Epidemiol*, vol. 17, no. 5, Aug, pp. 458-67.
- 1b. Wichmann, H.E., Spix, C., Tuch, T., Wolke, G., Peters, A., Heinrich, J., Kreyling, W.G., Heyder, J., 2000. Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany part I: role of particle number and particle mass. Research report (Health Effects Institute), no. 98, pp. 5-86; discussion 87-94.
2. Douglas W. Dockery, C A P, Xiping Xu, John D. Spengler, James H. Ware, Martha E. Fay, Benjamin G. Ferris, and Frank E. Speizer, 1993. An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *The New England Journal of Medicine*, vol. 329, pp. 1739-1759.
3. Janssen, N A H, Schwartz, J, Zanobetti, A, Suh, H H, 2002. Air conditioning and source-specific particles as modifiers of the effect of PM10 on hospital admissions for heart and lung disease. *Environ Health Perspect*, vol. 110, no. 1, pp. 43-49.
4. Long, C M, Suh, H H, Kobzik, L, Catalano, P J, Ning, Y Y, Koutrakis, P, 2001. A pilot investigation of the relative toxicity of indoor and outdoor fine particles: in vitro effects of endotoxin and other particulate properties. *Environ Health Perspect*, vol. 109, no. 10, pp. 1019-1026.
5. Pope, C A, Burnett, R T, Thun, M J, Calle, E E, Krewski, D, Ito, K, Thurston, G D, 2002. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *Jama - Journal of the American Medical Association*, vol. 287, no. 9, pp. 1132-1141.
6. Wei, Y, Han, I K, Shao, M, Hu, M, Zhang, O J, Tang, X, 2009. PM2.5 constituents and oxidative DNA damage in humans. *Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 13, Jul 1, pp. 4757-4762.
7. Wilson, W E, Mage, D T, Grant, L D, 2000. Estimating separately personal exposure to ambient and nonambient particulate matter for epidemiology and risk assessment: why and how. *J Air waste Manag Assoc*, vol. 50, no. 7, Jul, pp. 1167-1183.
8. Clausen, G, 2004. Ventilation filters and indoor air quality: a review of research from the International Centre for Indoor Environment and Energy. *Indoor air*, vol. 14 no. 7, pp. 202-207.
9. Socialstyrelsen (2006) Partiklar i inomhusmiljön en litteraturgenomgång.  
<http://www.folkhalsomyndigheten.se/publicerat-material/publikationer/Partiklar-i-inomhusmiljon---en-litteraturgenomgang/>
10. Luftkvalitetsförordning SFS 2010:477, Miljödepartementet, 2010.
11. SS EN 779:2012, Particulate air filters for general ventilation – Determination of the filtration performance. Svensk Standard, CEN – European Committee for Standardization.
12. SP-metod 1937, P-märkning av luftfilter, Sveriges Tekniska Forskningsinstitut, Borås, Utgåva 5 2011.
13. ISO/FDIS 16890-1:2016. Air filters for general ventilation — Part 1: Technical specifications, requirements and classification system based upon particulate matter efficiency (ePM), Final draft International Standard, ISO.

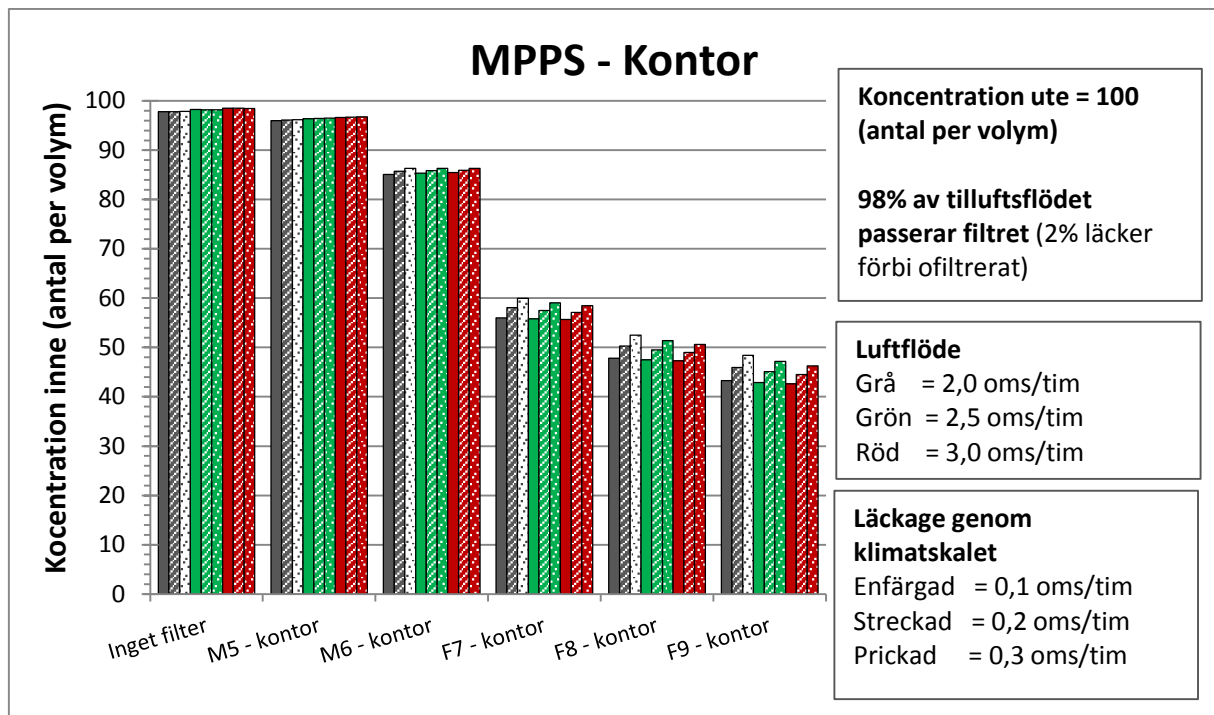
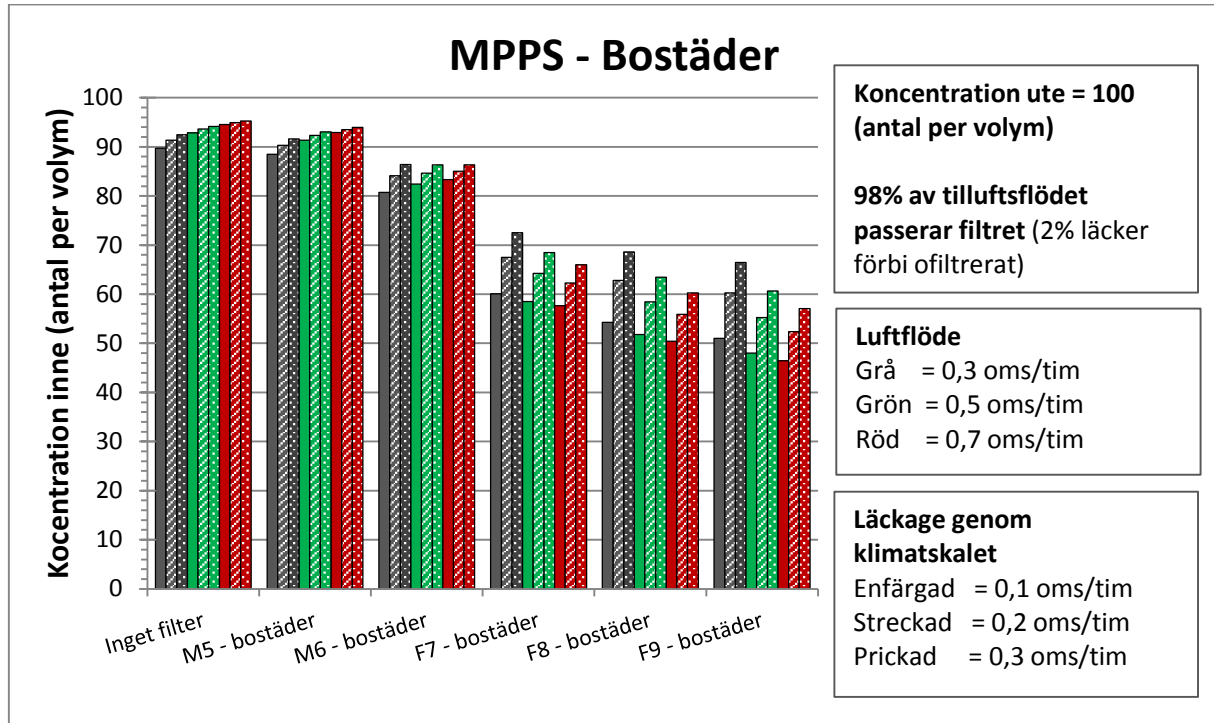
14. AFS 2009:2 med ändringar t o m AFS 2013:3. Arbetsplatsens utformning, Arbetsmiljöverkets föreskrifter om arbetsplatsens utformning samt allmänna råd om tillämpningen av föreskrifterna.
15. R1 Riktlinjer för Specifikation av Inneklimatkrav, Energi & Miljötekniska Föreningen, 2013.
16. Boverkets Byggregler – föreskrifter och allmänna råd, BFS 2011:6 med ändringar t o m BFS 2015:3, BBR22.
17. SS EN 13779, Luftbehandling – Funktionskrav på ventilations- och luftkonditioneringsystem, Utgåva 2, 2007.
18. Shi, Bingbing (2012). Removal of ultrafine particles by intermediate air filters in ventilation systems. Evaluation of performance and analysis of applications. Institutionen för Energi & Miljö, Avdelningen för Installationsteknik, Chalmers Tekniska Högskola, Göteborg. ISBN/ISSN: 978-91-7385-782-6.
19. NT VVS 114, Indoor Air Quality: Measurement of CO<sub>2</sub>, Espoo, Finland, 1997.
20. Sikander, E. och Wahlgren, P. 2008. Alternativa metoder för utvärdering av byggnadsskalets lufttäthet Energiteknik, SP Rapport 2008:36, SP Sveriges Tekniska Forskningsinstitut.
21. BV2 – Byggnadens värmebalans i varaktighetsdiagram, version 2012, <http://www.bv2.se/>
22. Blomsterberg, Å. And Burke, S. 2012, Airtightness of office and educational buildings in Sweden – Measurements and analyses, 33rd AIVC Conference Optimising Ventilative Cooling and Airtightness for [Nearly] Zero-Energy Buildings, IAQ and Comfort, Copenhagen, Denmark, 10-11 October 2012.
23. Liu, D. and Nazaroff, W.W. (2001) Modeling pollutant penetration across building envelopes, Atmos. Environ., Vol. 35, No. 26, pp. 4451-4462.
24. Riley, W.J., McKone, T.E., Lai, A.C., Nazaroff, W.W. (2002) Indoor particulate matter of outdoor origin: Importance of size-dependent removal mechanisms, Environ. Sci. Technol., Vol. 36, No.2, pp. 200-207.
25. SS-EN 1886:2007 Luftbehandling – Luftbehandlingsaggregat – Mekaniska Egenskaper, Svensk Standard, CEN – European Committee for Standardization.
26. Hanley, J.T., Ensor, D.S., Smith, D.D., Sparks, L.E., 1994. Fractional Aerosol Filtration Efficiency of in-Duct Ventilation Air Cleaners. Indoor Air-International Journal of Indoor Air Quality and Climate, vol. 4, no. 3, pp. 169-178.
27. SS-EN 1822:2009, Högeffektiva luftfilter (EPA, HEPA och ULPA), del 1-5.
28. El Orch, Z., Stephens, B., Waring, M.S. (2014) Predictions and determinants of size-resolved particle infiltration factors in single-family homes in the U.S., Building and Environment 74, pp. 106-118.

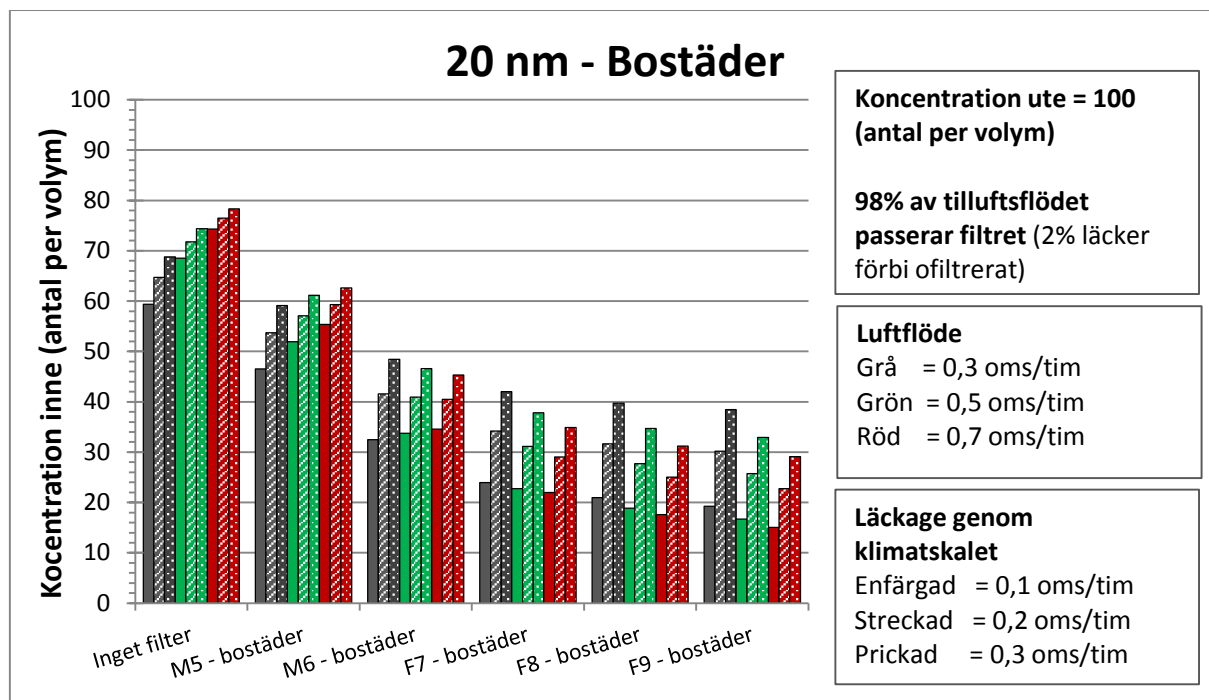
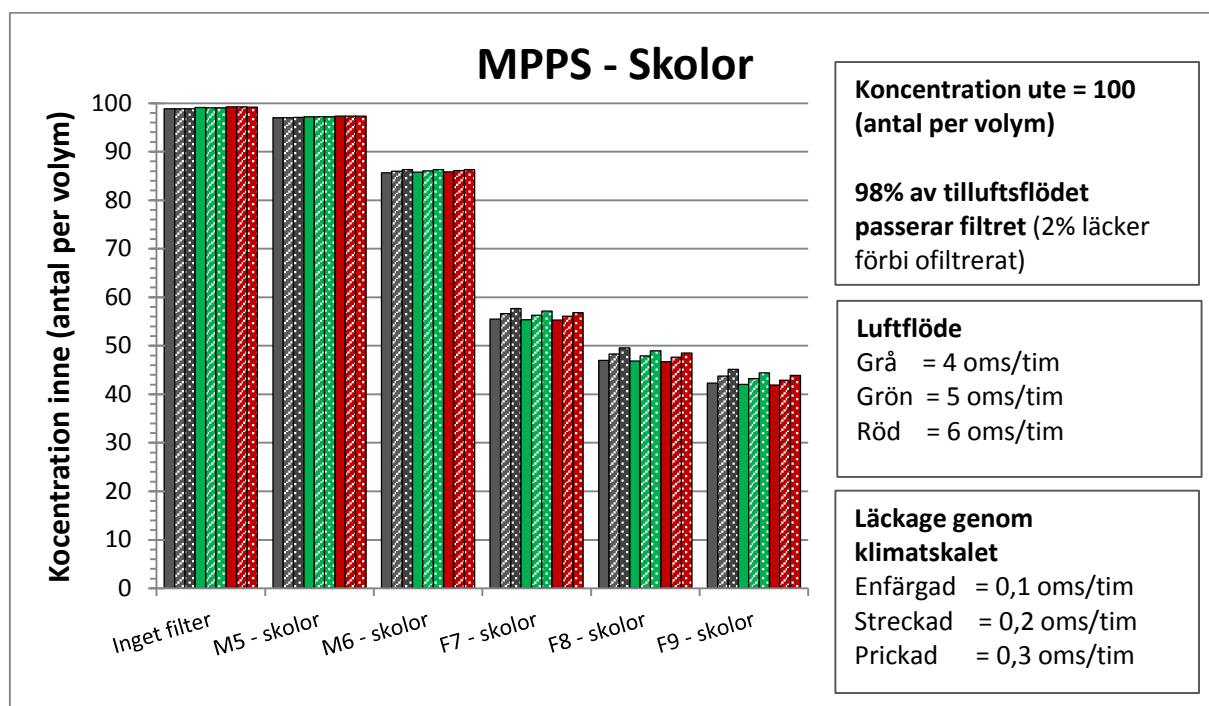


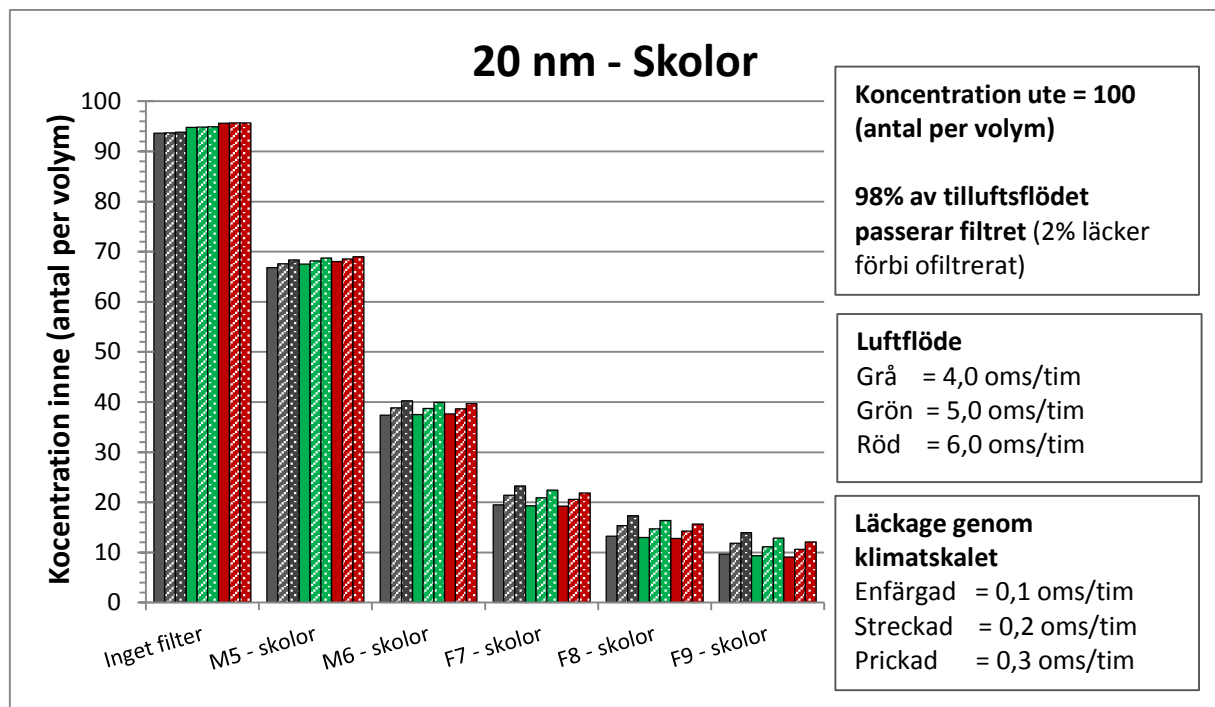
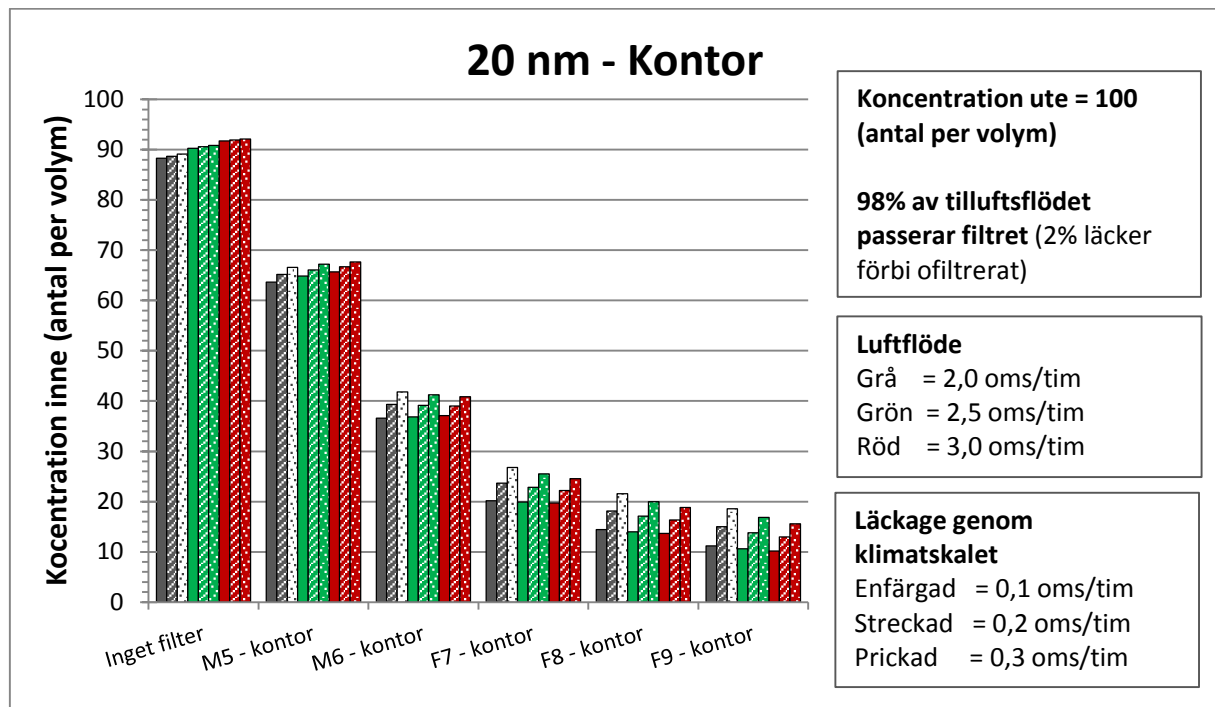
## Bilaga 1. Koncentration inomhus för olika byggnadstyper med glasfiberfilter av olika klass



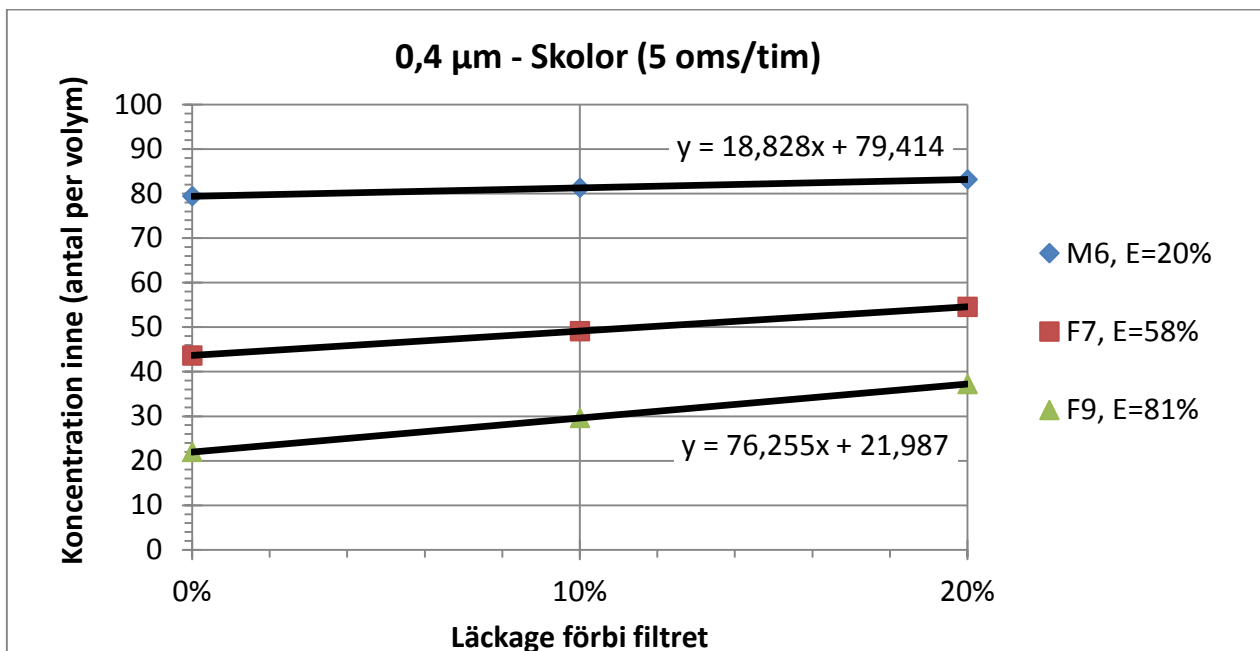
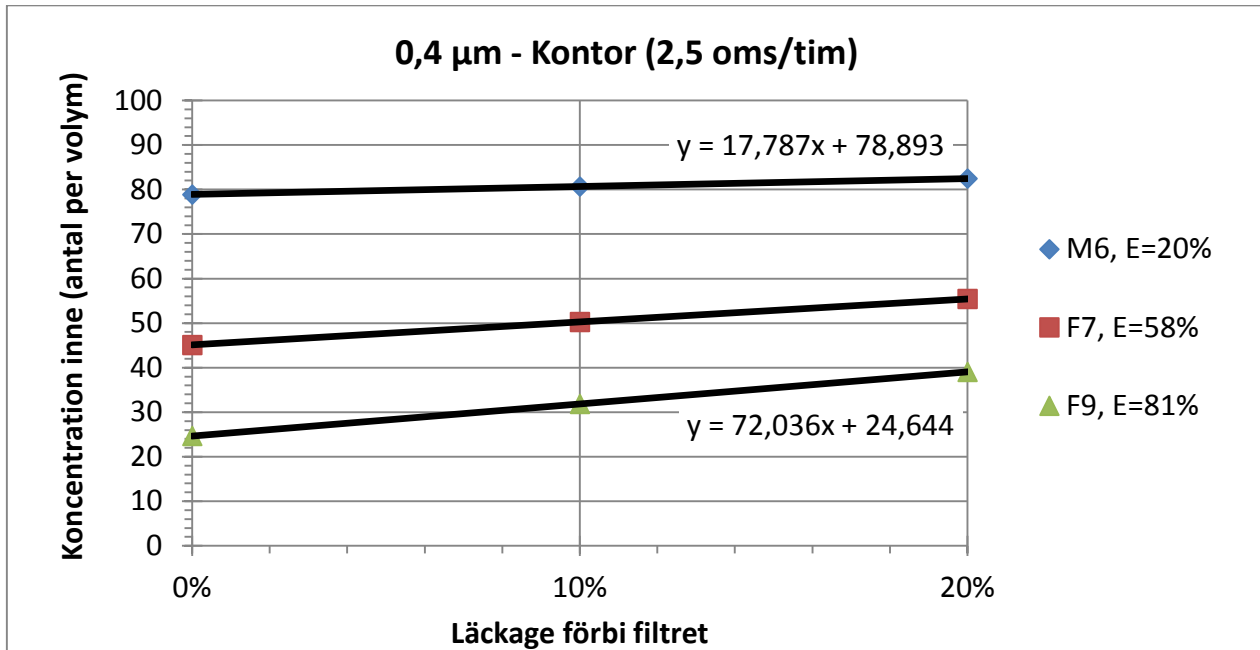
## Bilaga 2. Koncentration inomhus för olika byggnadstyper, med olika luftomsättning och läckage genom byggnadsskalet







### Bilaga 3. Inverkan av läckage förbi filtret



## Bilaga 4. Mätningar i testkammare

Här redovisas resultatet av partikelmätningar i en testkammare genomförda i januari 2016. Syftet med mätningarna var att pröva resultatet från beräkningarna.

### Metod

Testkammaren är belägen vid Camfil AB i Trosa. Den har innerytor av polerat rostfritt stål och har dimensionerna 2,49×3,35×2,36 m. Den inre volymen är således 19,7 m<sup>3</sup>. Kammaren ventilerades med hjälp av ett tilluftsaggregat som tillförde luft från den laboratoriehall där kammaren är placerad. Mätningar gjordes dels utan filter, dels med filter av olika klass. Filtren var kvartsmoduler av påsfilter med glasfibermedia. Kammarluften bladades försiktigt om med hjälp av en liten fläkt placerad inne i kammaren.

Förutom tilluft tillfördes ett litet flöde av ofiltrerad luft från laboratoriehallen för att simulera inläckage av uteluft genom otätheter i byggnadsskalet. Denna luft tillfördes via en slang med innerdiameter 38 mm. Tilluftsflödet och frånluftsflödet bestämdes genom att mäta tryckfallet över kalibrerade mätflänsar.

Partikelkoncentrationerna mättes med två samkalibrerade partikelräknare av fabrikat TSI, modell AeroTrak. Enligt samkalibreringen visade det ena instrumentet knappt 3 % lägre värde för partiklar i storleksintervallet 0,3-0,5 µm. Mätresultatet korrigerades för denna avvikelse. Den ena partikelräknaren användes för att mäta partikelkoncentrationen utanför testkammaren vid inloppet till tilluftsaggregatet. Den andra partikelräknaren användes för att mäta partikelkoncentrationen dels i tilluften, dels inne i kammaren.

### Resultat

I Tabell B4.1 summeras resultatet av mätningar utanför kammaren och i tilluften, dels utan filter, dels med filter av olika kvalitet monterade i aggregatet. Mätresultatet användes för att beräkna filtrens penetration och avskiljningsgrad.

**Tabell B4.1.** Resultat av partikelmätningar mätningar före och efter tilluftssystemet. Resultaten avser partiklar i storleksintervallet 0,3-0,5 µm.

Fall	Penetration		Avskiljningsgrad
	Medelvärde	Standardavvikelse	
Utan filter	105 %	4 %	-
Filter A	99 %	7 %	1 %
Filter B	77 %	3 %	23 %
Filter C	75 %	4 %	25 %
Filter D	45 %	3 %	55 %
Filter E	13 %	1 %	87 %

En mätserie genomfördes utan filter, med ett tilluftsflöde motsvarande 1,0 luftomsättningar per timme och utan läckageflöde. Kvoten mellan koncentrationen inne i kammaren och den utanför (I/U-kvot) stabiliserades då vid värdet 0,83. Koncentrationen i kammaren var alltså 83 % av den utanför.

Enligt den teori som redovisas i huvuddelen av denna rapport beräknas koncentrationen i kammaren vid de aktuella förutsättningarna bli 92 % av den utanför, alltså 9 procentenheter högre än vad mätningen visade. Detta värde gäller under antagande att partikeldepositionen i kammaren motsvarar  $k_{\text{dep}}=0,08 \text{ h}^{-1}$ . Om man istället antar att depositions hastigheten är  $k_{\text{dep}}=0,18 \text{ h}^{-1}$  stämmer beräkningen helt med mätresultat, d v s den beräknade koncentrationen i kammaren blir 83 % av den utanför. Som påpekas i rapporten, under rubriken *Deposition av partiklar inne*, kan depositions hastigheten variera kraftigt mellan olika rum och det erhållna värdet är fullt rimligt. Mätningen utan filter visar alltså att depositions hastigheten i den aktuella testkammaren är  $0,18 \text{ h}^{-1}$ .

I Tabell B4.2 redovisas ytterligare sex mätserier med olika kombinationer av filter, luftomsättning och läckage. Den "läckageluft" som tillfördes testkammaren hade en koncentration av partiklar, i storleksintervallet 0,3-0,5  $\mu\text{m}$ , som var 89 % av partikelkoncentrationen utanför testkammaren. Som framgår at Tabell B4.2 skiljde det som mest 7 procentenheter mellan uppmätta och beräknade värden.

**Tabell B4.2.** Resultat av partikelmätningar inne i och utanför testkammaren, tillsammans med beräknat resultat. Beräkningen har gjorts med  $k_{\text{dep}}$  satt till  $0,18 \text{ h}^{-1}$ . Resultaten avser partiklar i storleksintervallet 0,3-0,5  $\mu\text{m}$ .

Fall	Uppmätt I/U-kvot*		Beräknad I/U-kvot	Differens mätning-beräkning
	Medelvärde	Standardavvikelse		
Utan filter Ventilation= $2,5 \text{ h}^{-1}$ Läckage= $0,2 \text{ h}^{-1}$	88 %	3 %	92 %	4 %-enheter
Filter B Ventilation= $2,5 \text{ h}^{-1}$ Läckage= $0,2 \text{ h}^{-1}$	67 %	3 %	73 %	6 %-enheter
Filter D Ventilation= $2,5 \text{ h}^{-1}$ Läckage= $0,2 \text{ h}^{-1}$	38 %	2 %	45 %	7 %-enheter
Filter E Ventilation= $2,5 \text{ h}^{-1}$ Läckage= $0,2 \text{ h}^{-1}$	20 %	1 %	18 %	2 % enheter
Filter E Ventilation = $1,0 \text{ h}^{-1}$ Läckage = $0 \text{ h}^{-1}$	12 %	1 %	12 %	0 %-enheter
Filter E Ventilation = $1,0 \text{ h}^{-1}$ Läckage = $0,3 \text{ h}^{-1}$	20 %	2 %	20 %	0 %-enheter

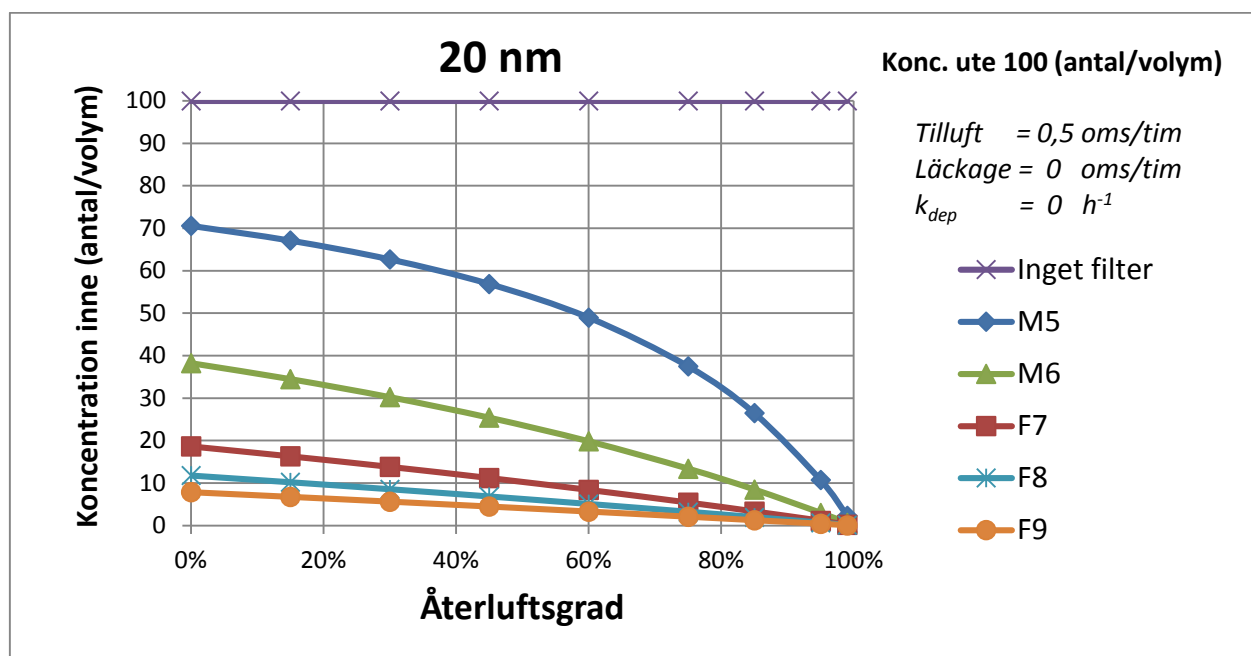
\*Koncentrationen i testkammaren i förhållande till koncentrationen utanför, uttryckt i procent.

## Bilaga 5. Beräkningsresultat för fall med återluft

I de följande diagrammen återges resultatet av beräkningar med ekvation (1) genomförda under antagande om att det förekommer återluft. I beräkningen bakom Figur B5.1 har depositionshastigheten,  $k_{dep}$  och infiltrationen,  $q_{läck}$  båda satts till noll. Det handlar alltså om ett teoretiskt fall där inga partiklar deponeras inomhus och där det inte förekommer något luftläckage genom byggnadsskalet. Tilluftsflödet (summan av uteluft och återluft) är konstant. Med de givna förutsättningarna gäller diagrammet oavsett hur stort tilluftsflödet är, så länge det är konstant. Beräkningarna gäller ett fall då återluftsflödet och uteluftsflödet blandas och filtreras med en enda filterbank, se Figur 5. Resultatet blir desamma om uteluftsflödet och återluftsflödet filtreras separat – så länge de båda filterbankarna har filter med samma avskiljningsgrad.

Återluftsgraden 0 % innebär att det inte finns något återluftsflöde och därmed består tilluftsflödet till 100 % av filtrerad eller ofiltrerad uteluft. Koncentrationen inne i förhållande till koncentrationen ute får då samma värde som filtrets avskiljningsgrad. Återluftsgraden 100 % innebär att hela tilluftsflödet består av filtrerad eller ofiltrerad inomhusluft. Eftersom uteluftsflödet då är noll och eftersom beräkningsmodellen endast tar hänsyn till partiklar som tillförs utifrån blir koncentrationen inne i detta fall noll, oavsett filtrets avskiljningsgrad.

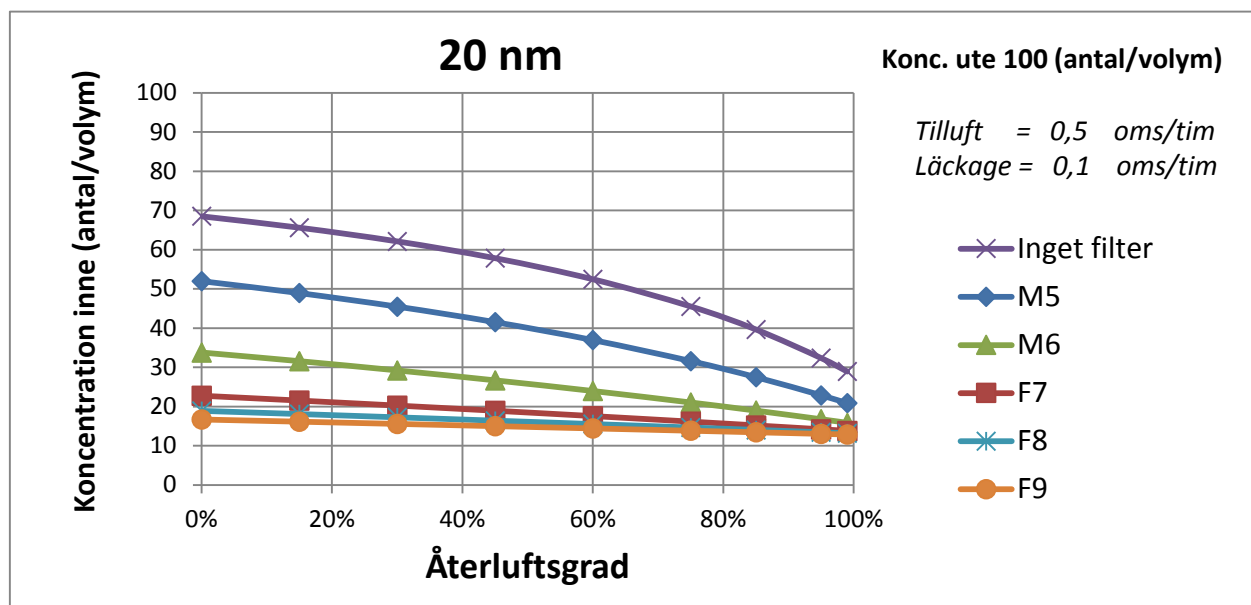
En återluftsgrad på 50 % innebär att återluftsflödet är lika stort som uteluftsflödet. Partikelkoncentrationen i inomhusluften bestäms av balansen mellan den mängd partiklar som tillförs utifrån och den mängd partiklar som fångas av filtret.



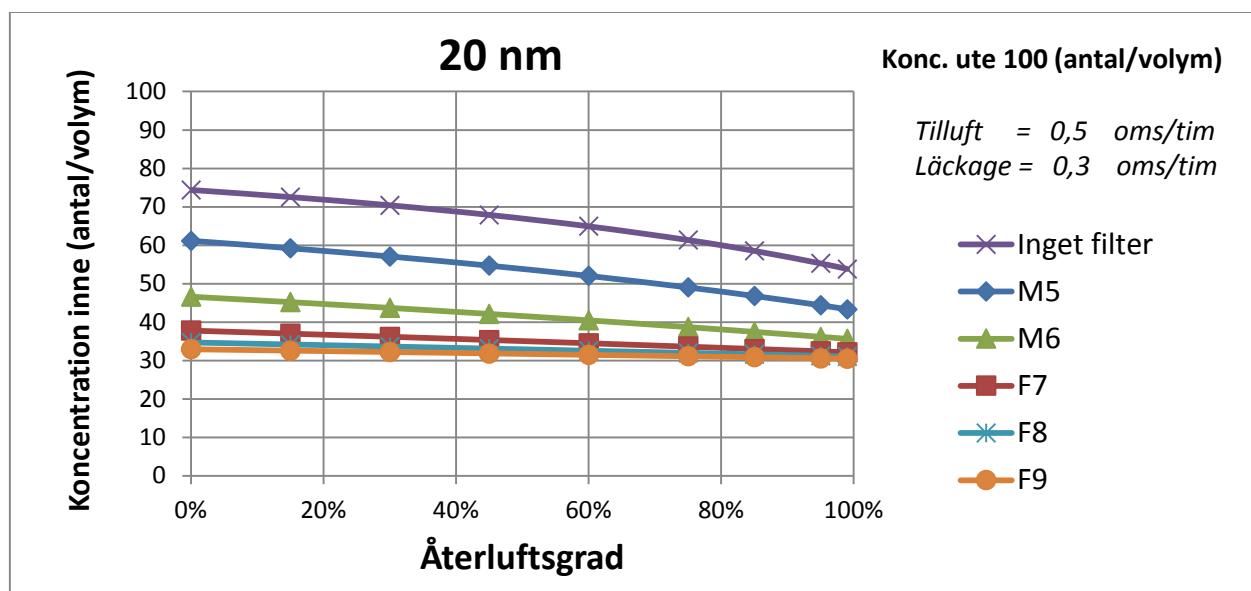
**Figur B5.1.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden. Diagrammet gäller under antagande att både partikeldepositionen inne och infiltrationen av luft genom byggnadsskalet är noll ( $k_{dep}=0$  och  $q_{läck}=0$ ). Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymsenhet luft.



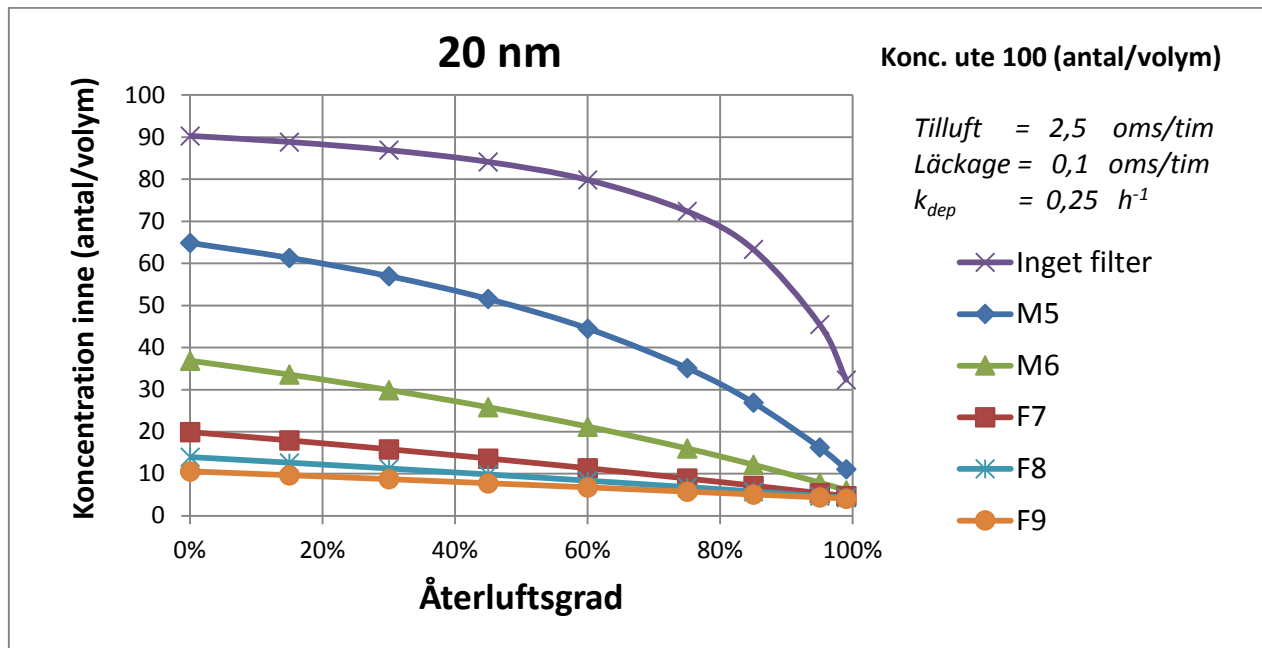
I de följande diagrammen har partikeldepositionen satts till  $k_{dep}=0,25 \text{ h}^{-1}$ . Beräkningar har gjort för två nivåer på luftläckaget genom byggnadsskalet. I det ena fallet motsvarar läckaget 0,1 luftomsättningar per timma och i det andra fallet 0,3 luftomsättningar per timma ( $q_{läck}/V = 0,1 \text{ h}^{-1}$  respektive  $0,3 \text{ h}^{-1}$ ).



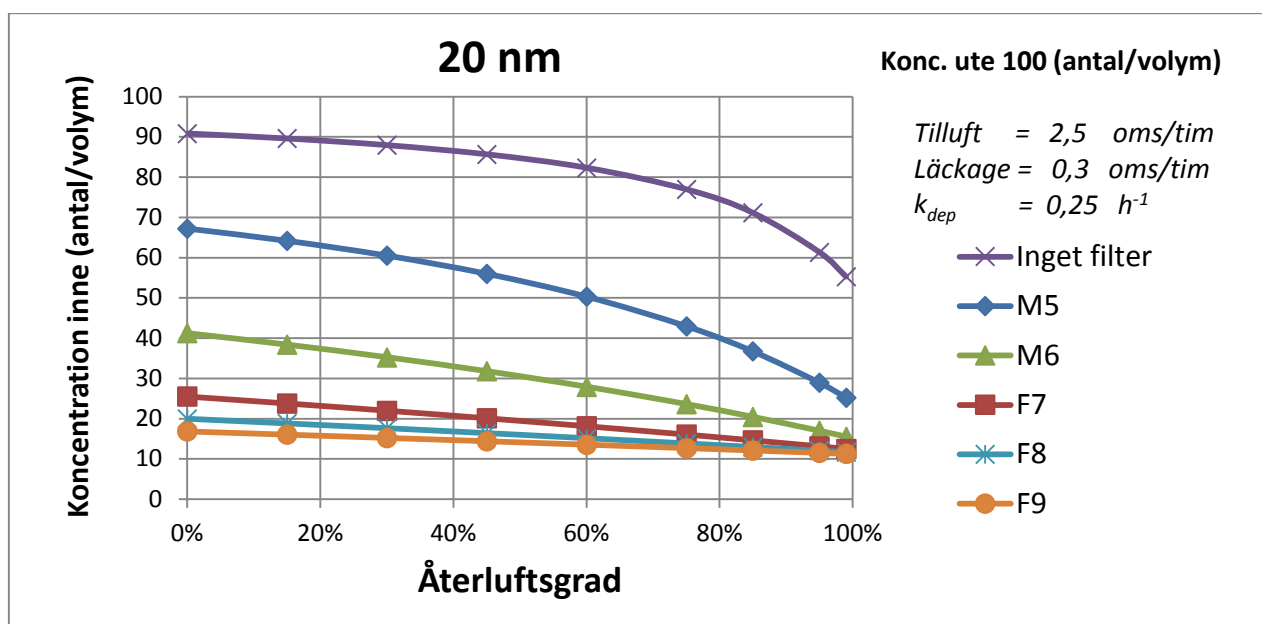
**Figur B5.2.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 0,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,1 luftomsättningar per timma.



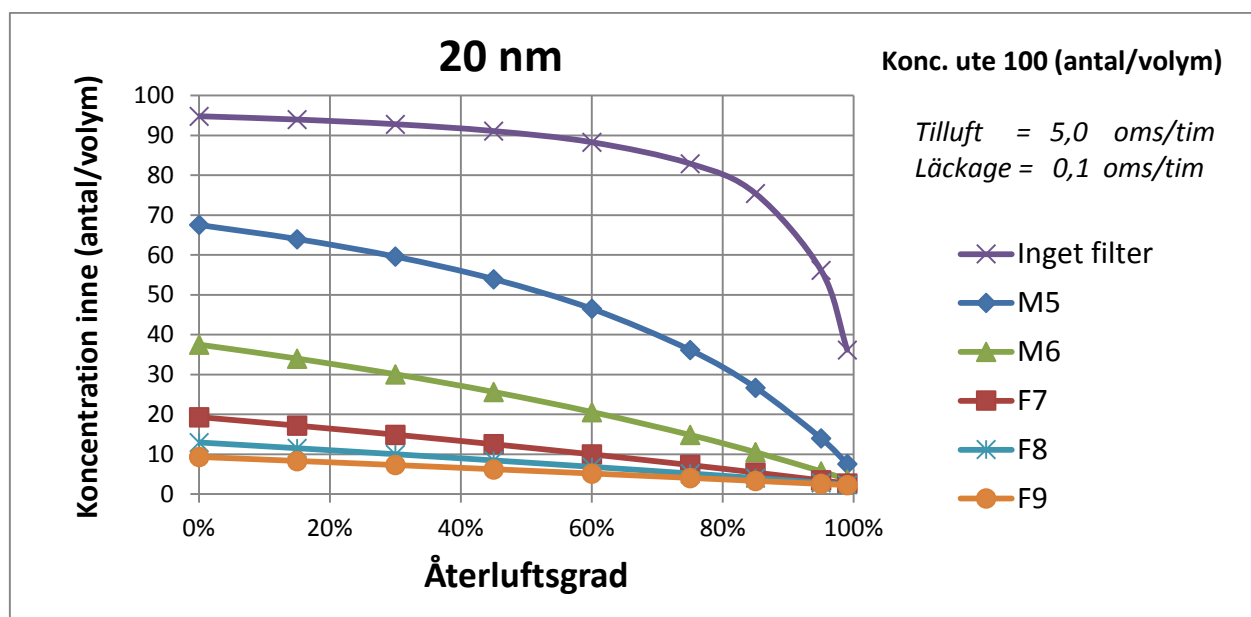
**Figur B5.3.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 0,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,3 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.



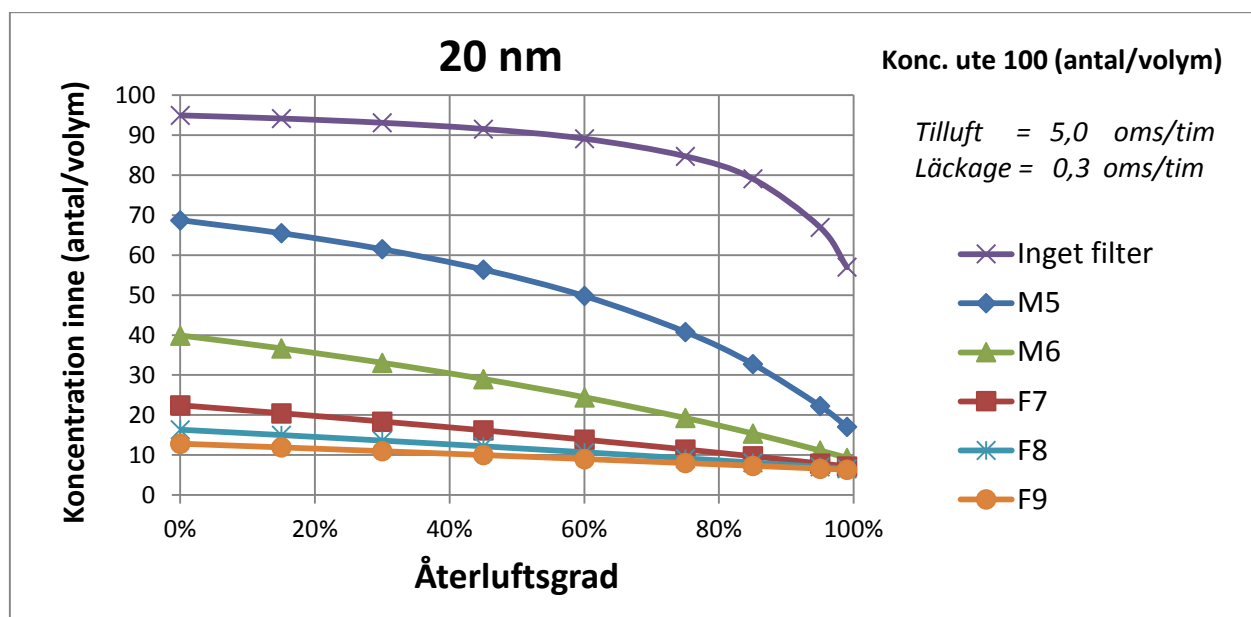
**Figur B5.4.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 2,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 h^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,1 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.



**Figur B5.5.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 2,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 h^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,3 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.

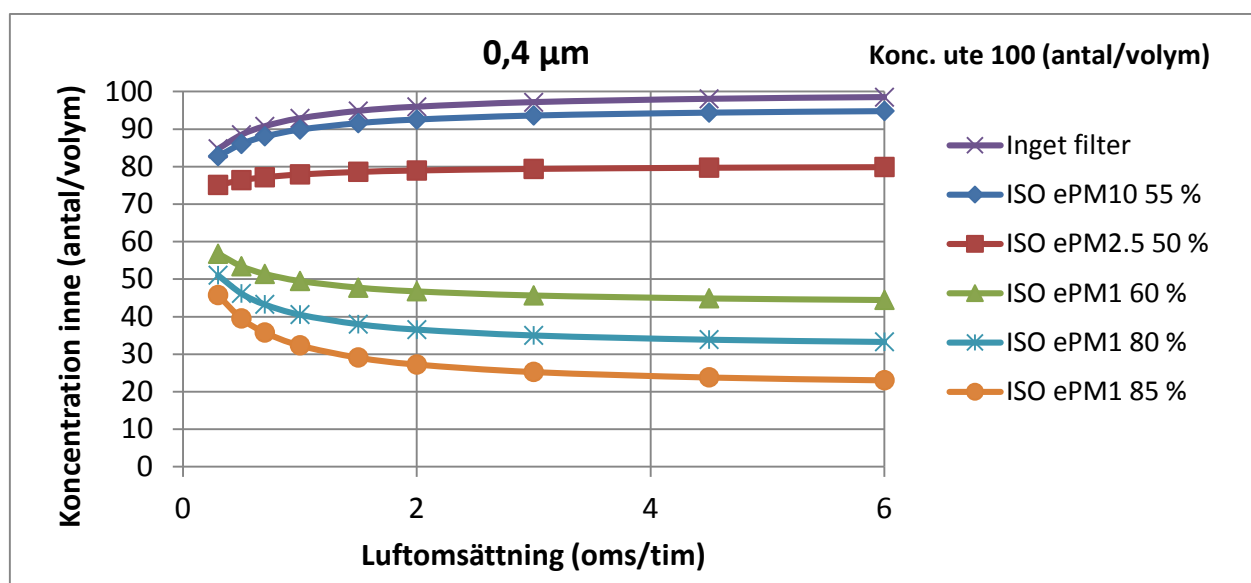


**Figur B5.6.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,1 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.

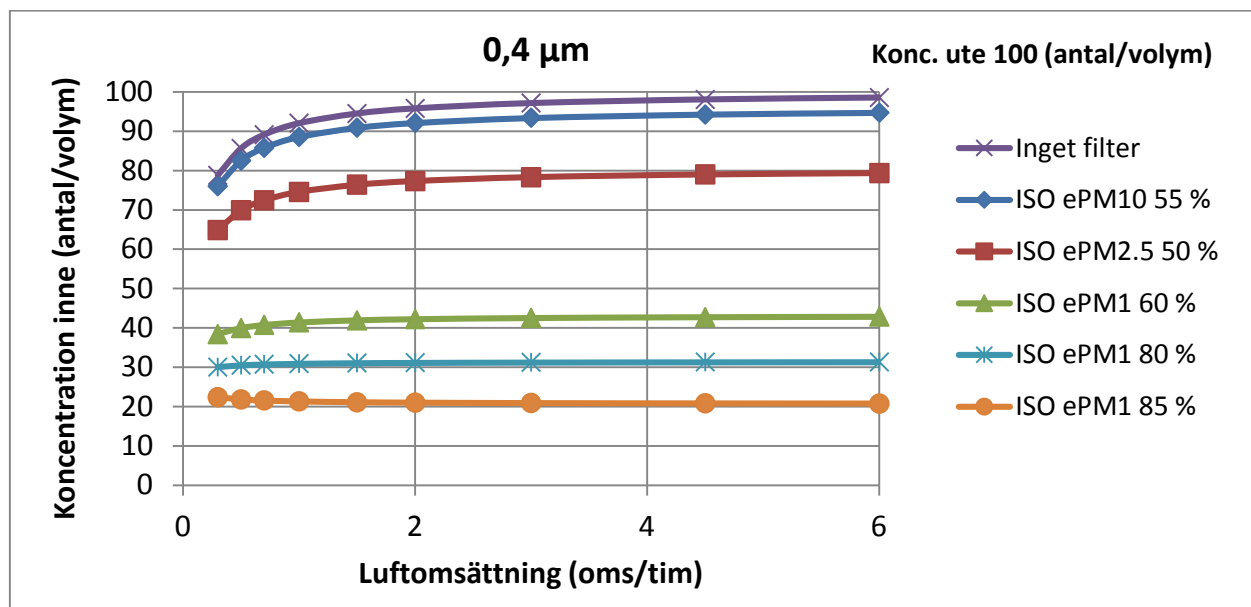


**Figur B5.7.** Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,3 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.

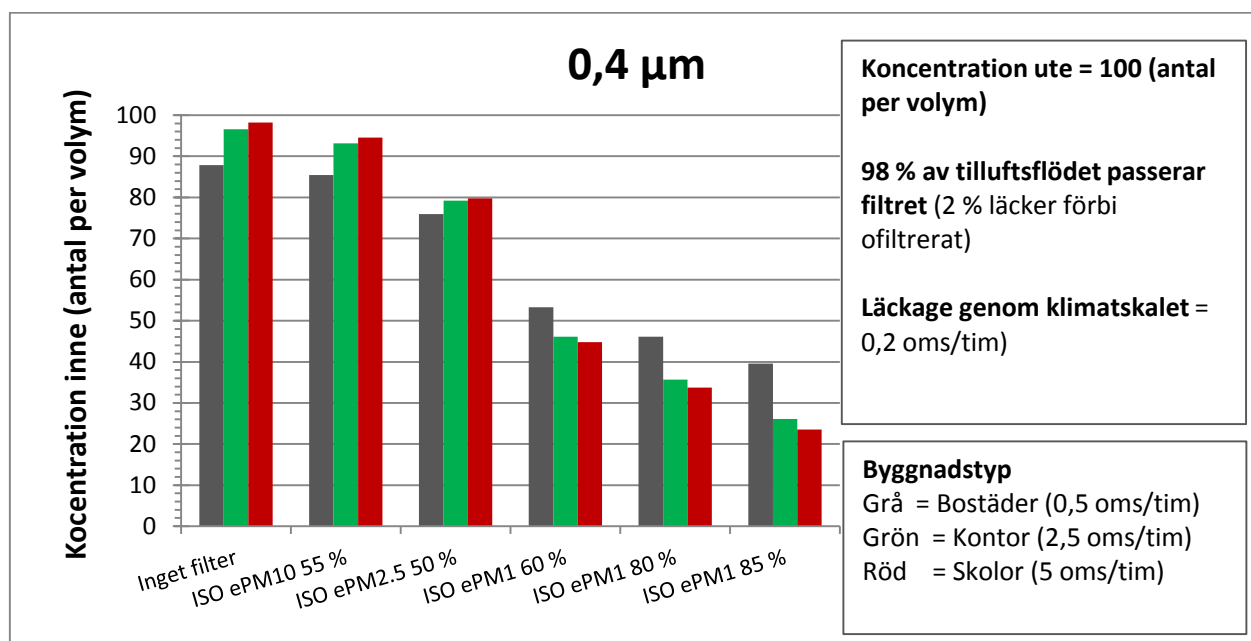
## Bilaga 6. Diagram med filterbeteckningar enligt ISO/FDIS 16890 – Fall utan återluft



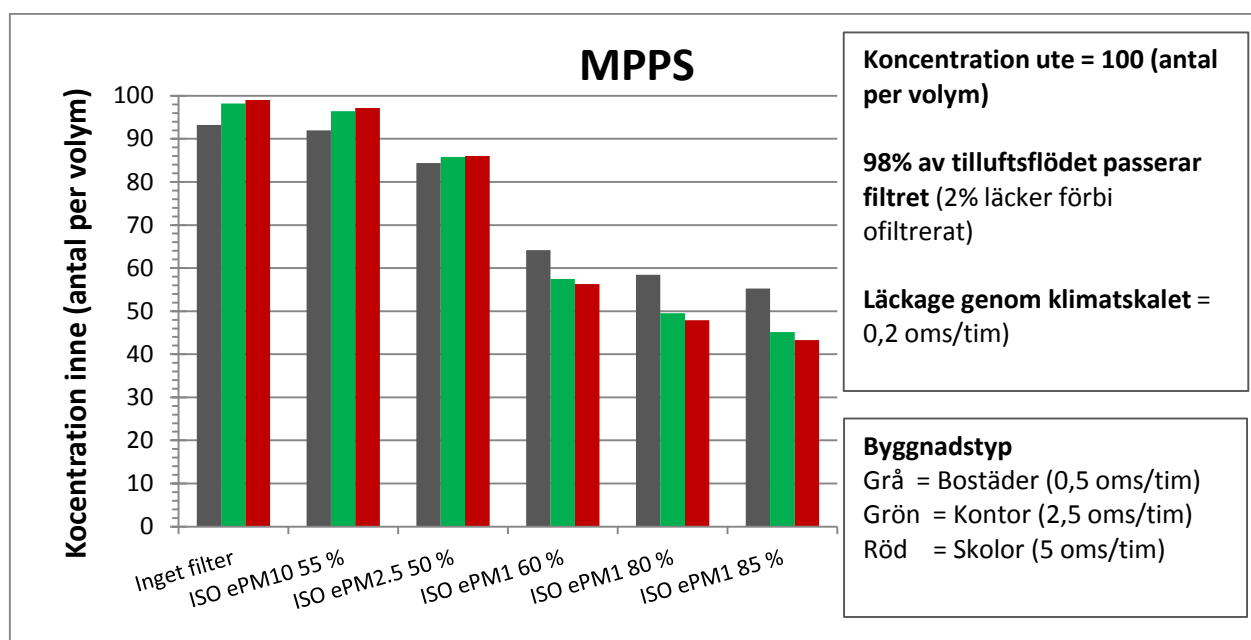
**Figur B6.1** (Som Figur 6 i rapportens huvuddel). Inomhusluftens koncentration av 0,4 µm stora partiklar beräknad under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Luftläckaget genom byggnadsskalet har satts till 0,2 luftomsättningar per timma och 2 % av uteluftsflödet antas läcka förbi filtret utan att renas. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt Tabell 1.



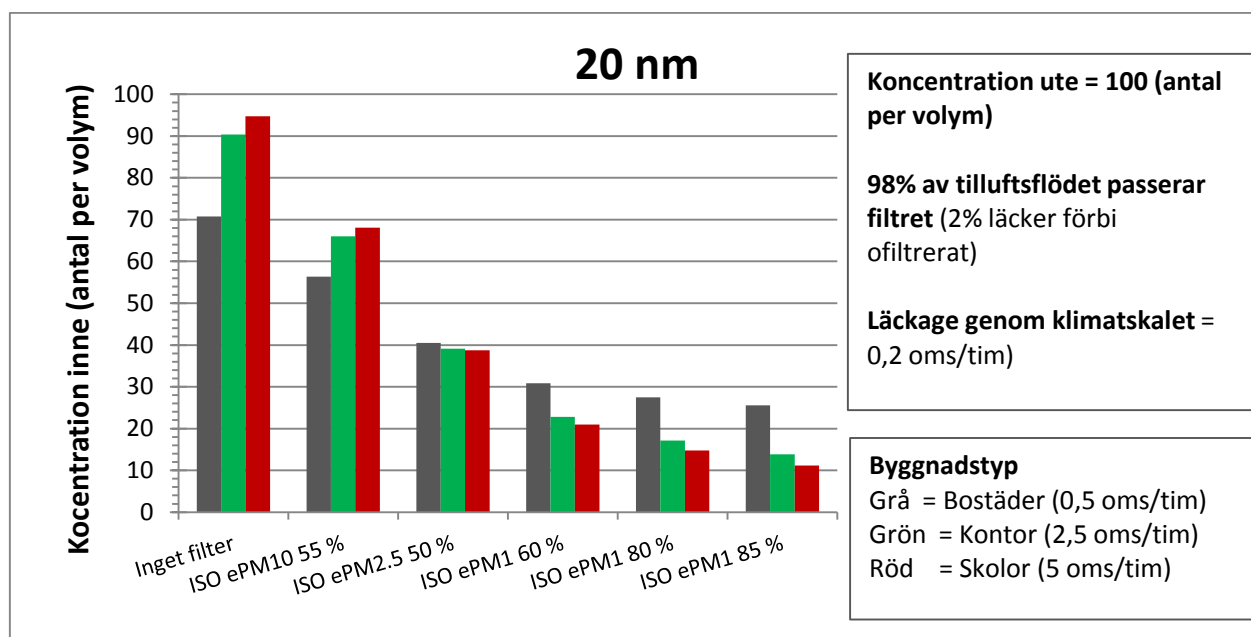
**Figur B6.2** (Som Figur 7 i rapportens huvuddel). Inomhusluftens koncentration av 0,4 µm stora partiklar beräknad under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Beräkningen avser en mycket tät byggnad. Luftläckaget genom byggnadsskalet har satts till 0,03 luftomsättningar per timma och 2 % av uteluftsflödet antas läcka förbi filtret utan att renas. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt Tabell 1.



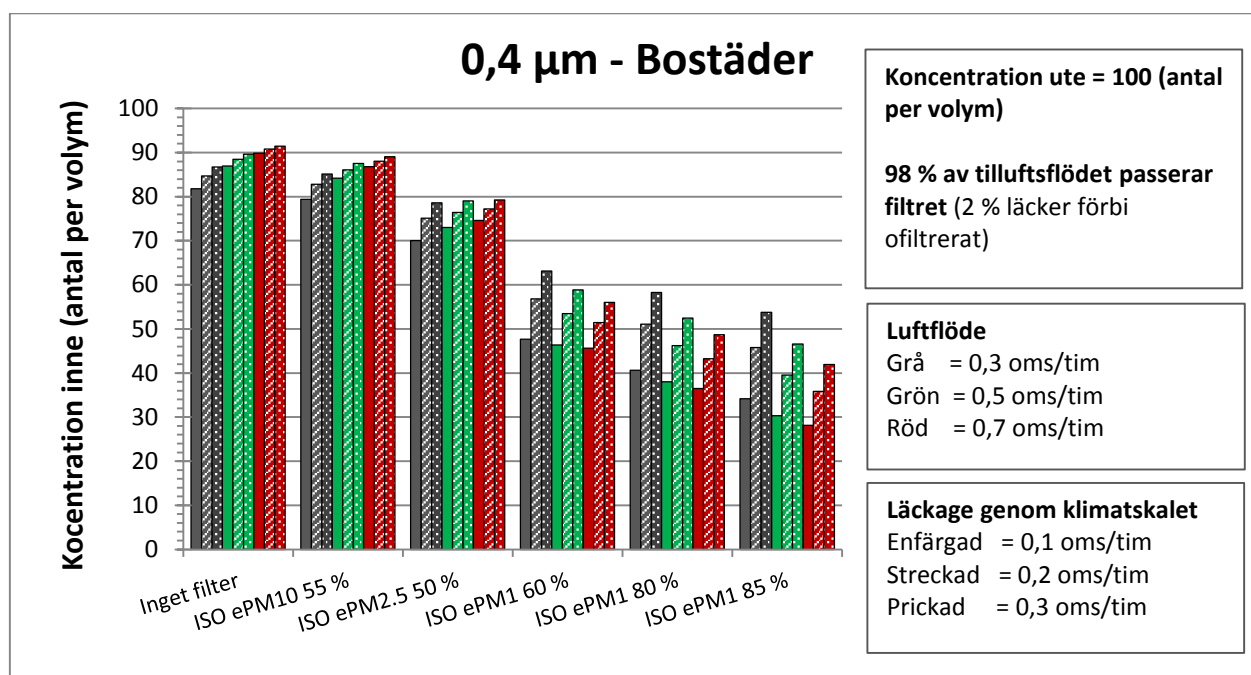
**Figur B6.3** (Som Figur 8 i rapportens huvuddel). Inomhusluftens koncentration av 0,4 µm stora partiklar beräknad under förutsättning att koncentrationen ute har värdet 100. Data redovisas för bostäder (0,5 oms/tim), kontor (2,5 oms/tim) och skolor (5 oms/tim). Luftläckaget genom byggnadsskalet har satts till 0,2 luftomsättningar per timma för alla tre byggnadstyperna, och 2 % av uteluftsflödet antas läcka förbi filtret utan att renas. Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt Tabell 1.



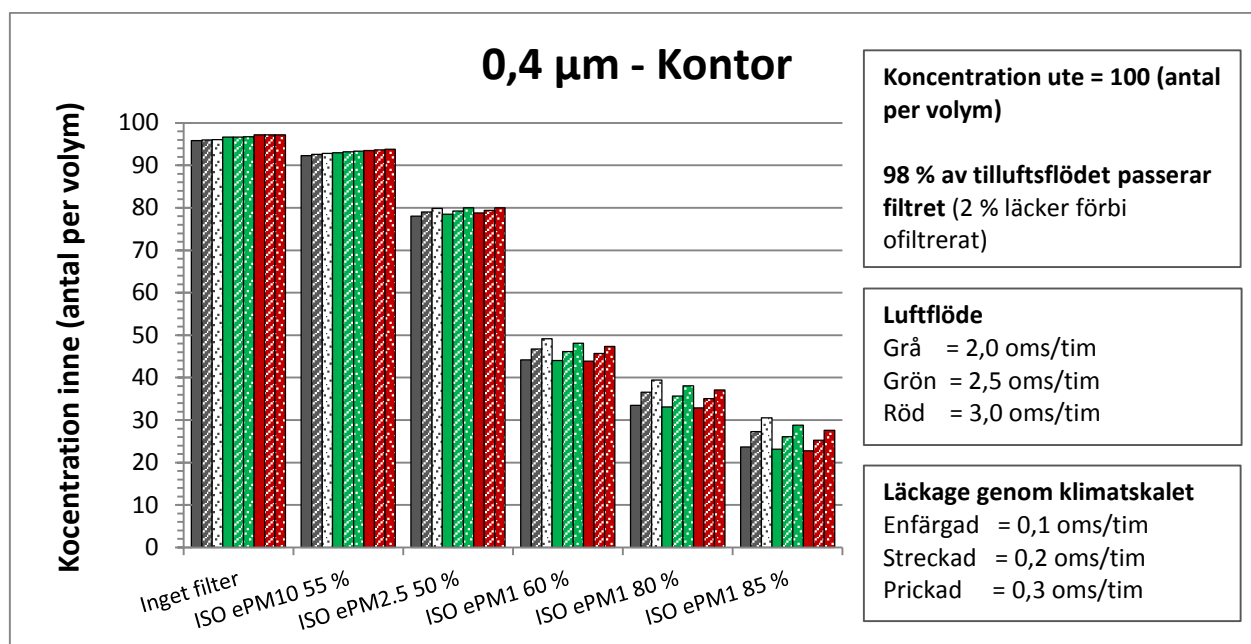
**Figur B6.4** (Som den övre figuren i Bilaga 1). Koncentration MPPS inomhus beräknad för olika byggnadstyper med glasfiberfilter av olika klass. Samma förutsättningar som Figur B6.3.



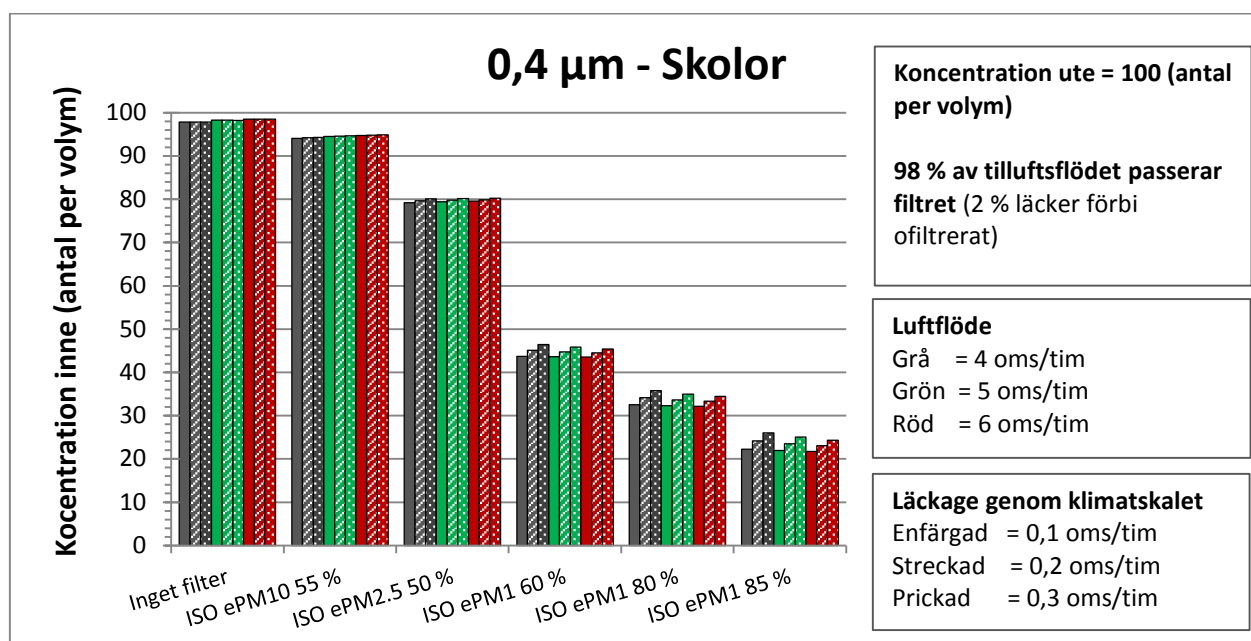
**Figur B6.5** (Som den nedre figuren i Bilaga 1). Koncentration av 20 nm partiklar inomhus beräknad för olika byggnadstyper med glasfiberfilter av olika klass. Samma förutsättningar som Figur B6.3.



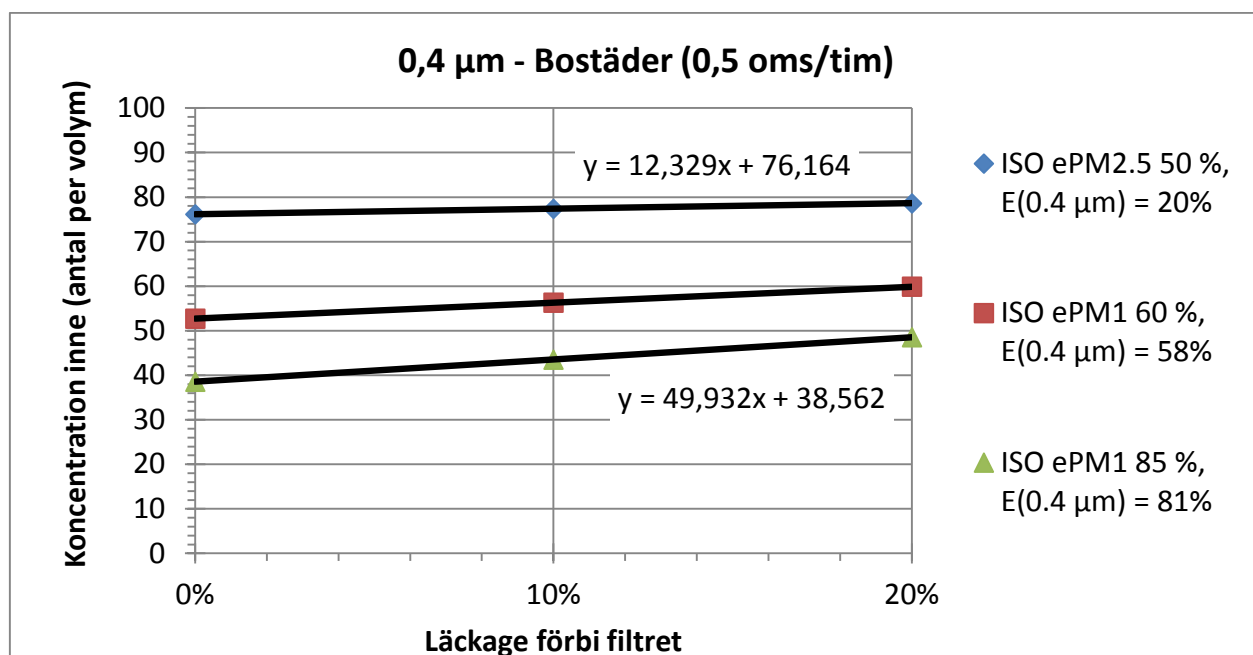
**Figur B6.6** (Som Figur 9a i rapportens huvuddel). Partikelkoncentrationer i bostäder beräknade för ventilationsflöden motsvarande 0,3 till 0,7 luftomsättningar per timma och för olika storlek på luftläckaget genom klimatskalet (mellan 0,1 och 0,3 luftomsättningar per timma). Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt Tabell 1.



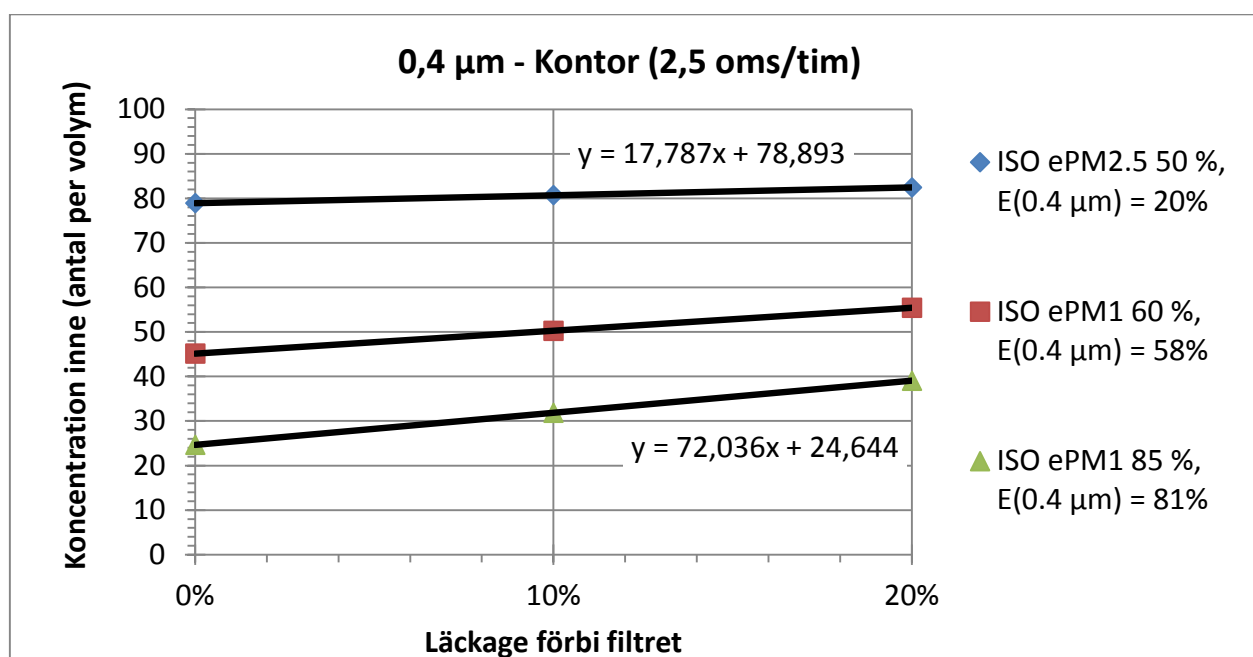
**Figur B6.7** (Som Figur 9b i rapportens huvuddel). Partikelkoncentrationer i kontor beräknade för ventilationsflöden motsvarande 2 till 3 luftomsättningar per timma och för olika storlek på luftläckaget genom klimatskalet (mellan 0,1 och 0,3 luftomsättningar per timma). Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt Tabell 1.



**Figur B6.8** (Som Figur 9c i rapportens huvuddel). Partikelkoncentrationer i skolor beräknade för ventilationsflöden motsvarande 4 till 6 luftomsättningar per timma och för olika storlek på luftläckaget genom klimatskalet (mellan 0,1 och 0,3 luftomsättningar per timma). Filtrens avskiljningsgrad avser glasfiberfilter med värden enligt Tabell 1.

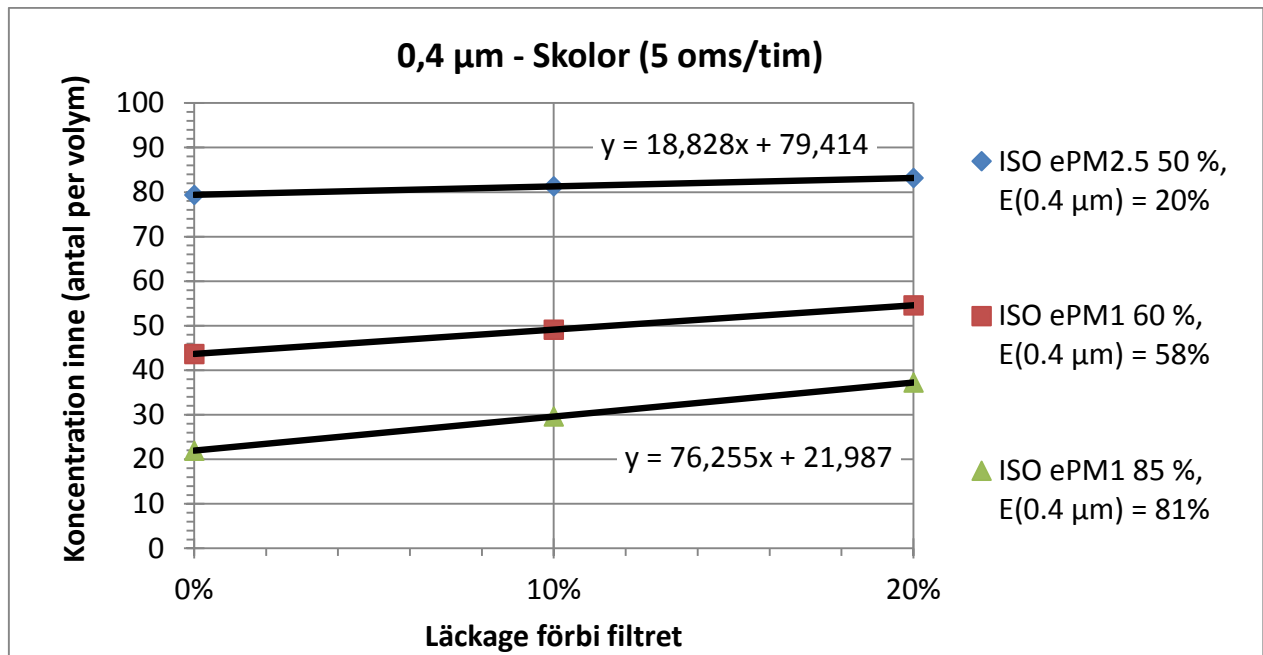


Figur B6.9 (Som Figur 10 i rapportens huvuddel). Koncentration av 0,4µm partiklar i bostäder beräknad som funktion av läckaget förbi filtret.



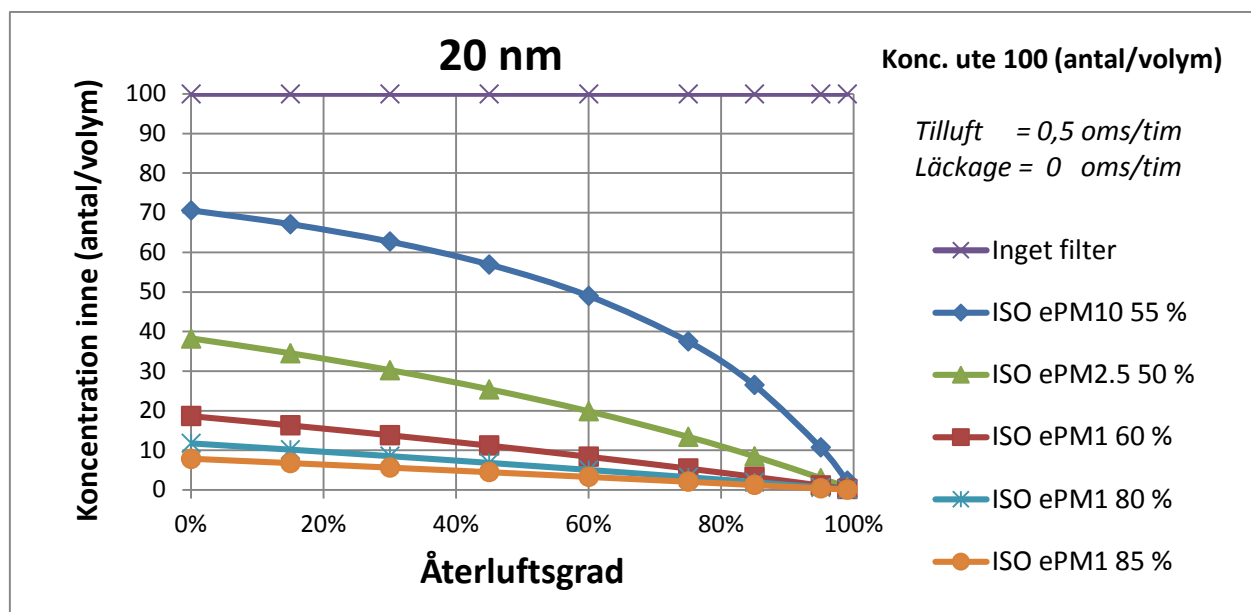
Figur B6.10 (Som den övre figuren i Bilaga 3). Koncentration av 0,4µm partiklar i kontor beräknad som funktion av läckaget förbi filtret.



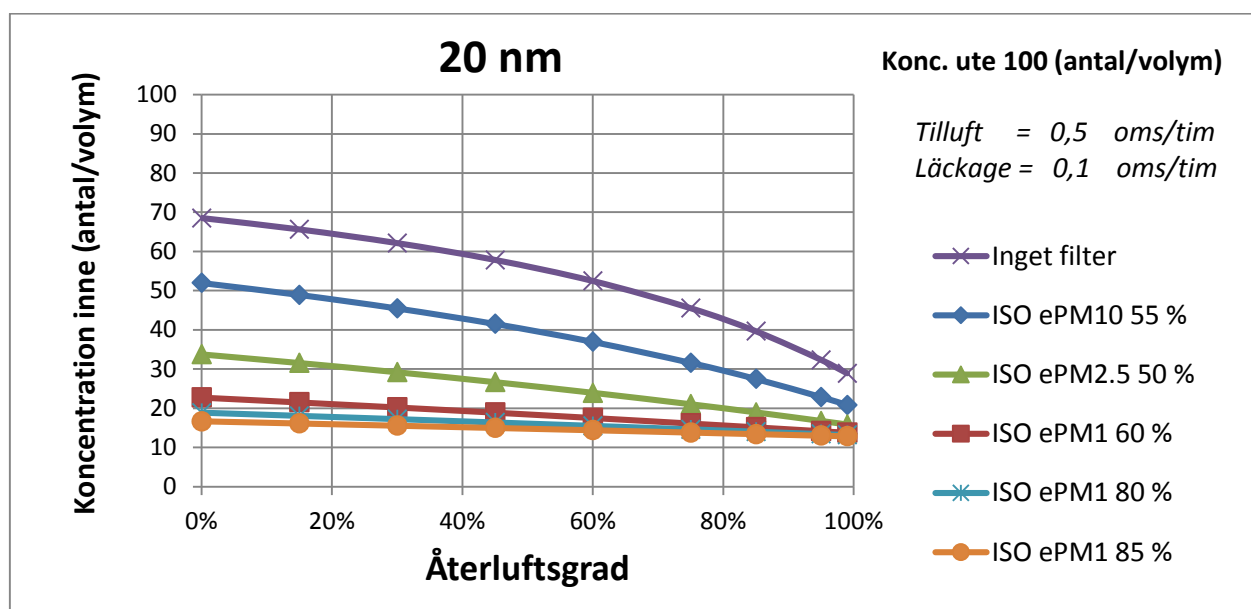


**Figur B6.11** (Som den nedre figuren i Bilaga 3). Koncentration av 0,4 $\mu\text{m}$  partiklar i skolor beräknad som funktion av läckaget förbi filtret.

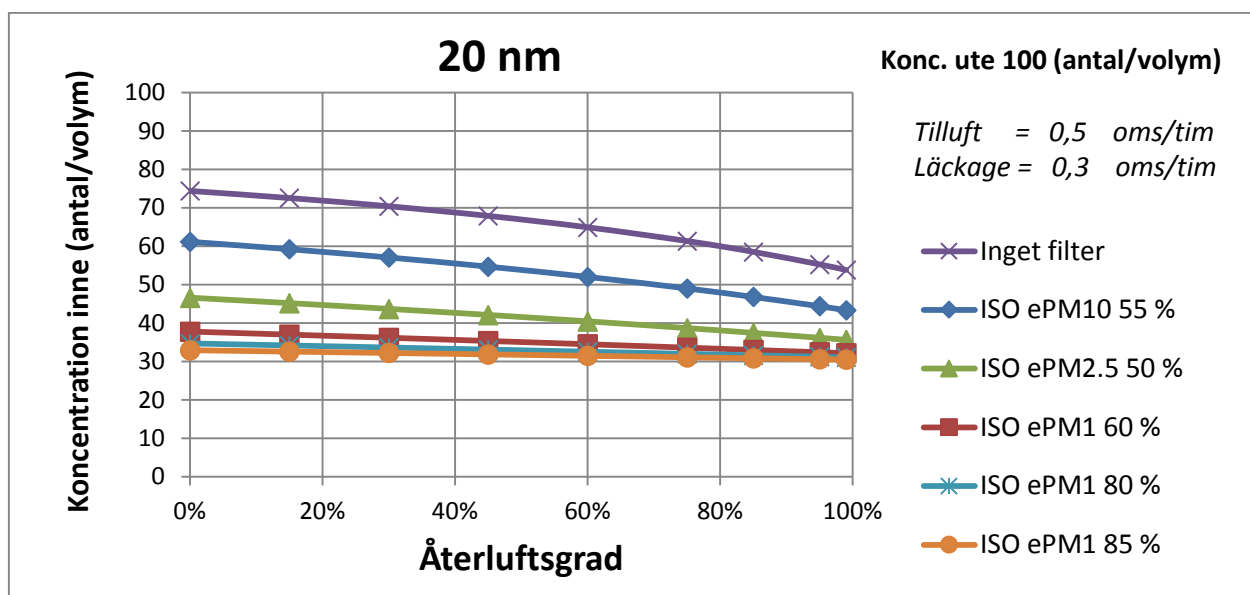
## Bilaga 7. Diagram med filterbeteckningar enligt ISO/FDIS 16890 – Fall med återluft



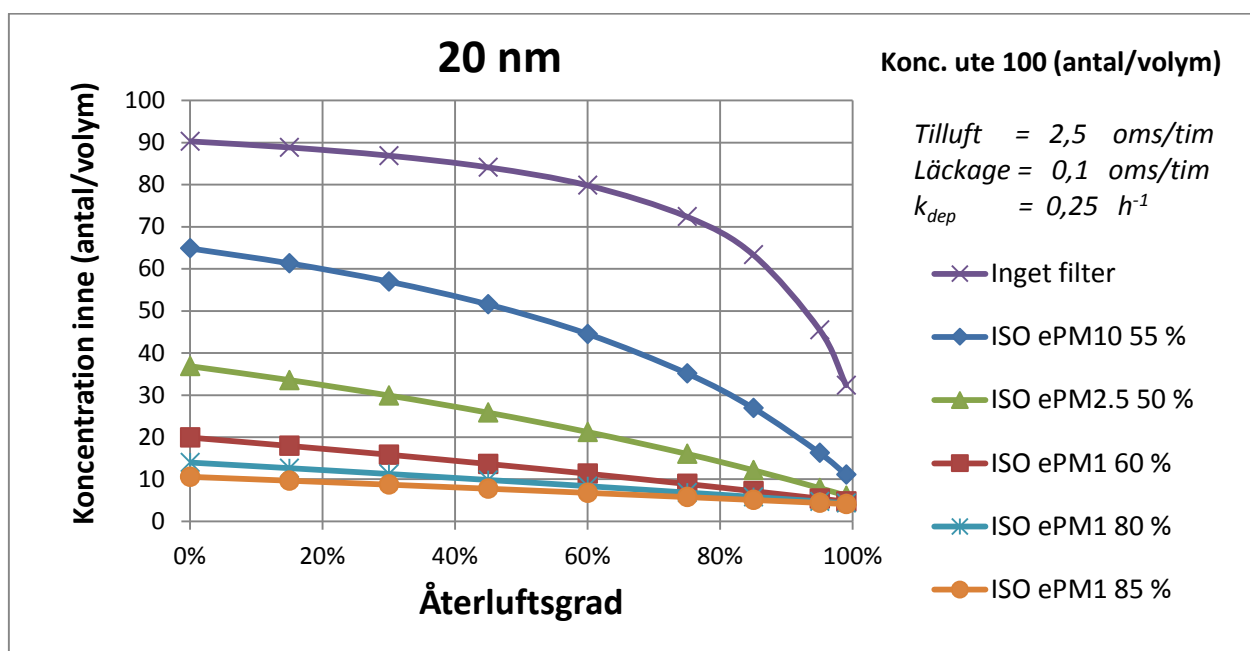
**Figur B7.1** (som Figur B5.1 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden. Diagrammet gäller under antagande att både partikeldepositionen inne och infiltrationen av luft genom byggnadskalet är noll ( $k_{dep}=0$  och  $q_{läck}=0$ ). Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymsenhet luft.



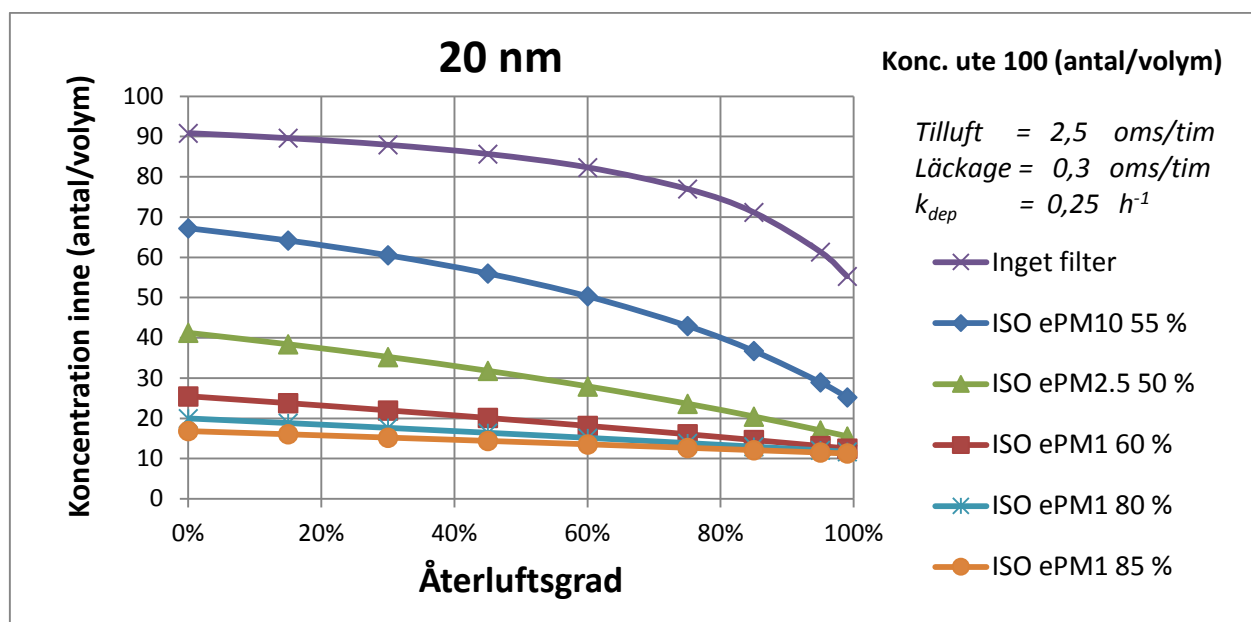
**Figur B7.2** (som Figur B5.2 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 0,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,1 luftomsättningar per timma.



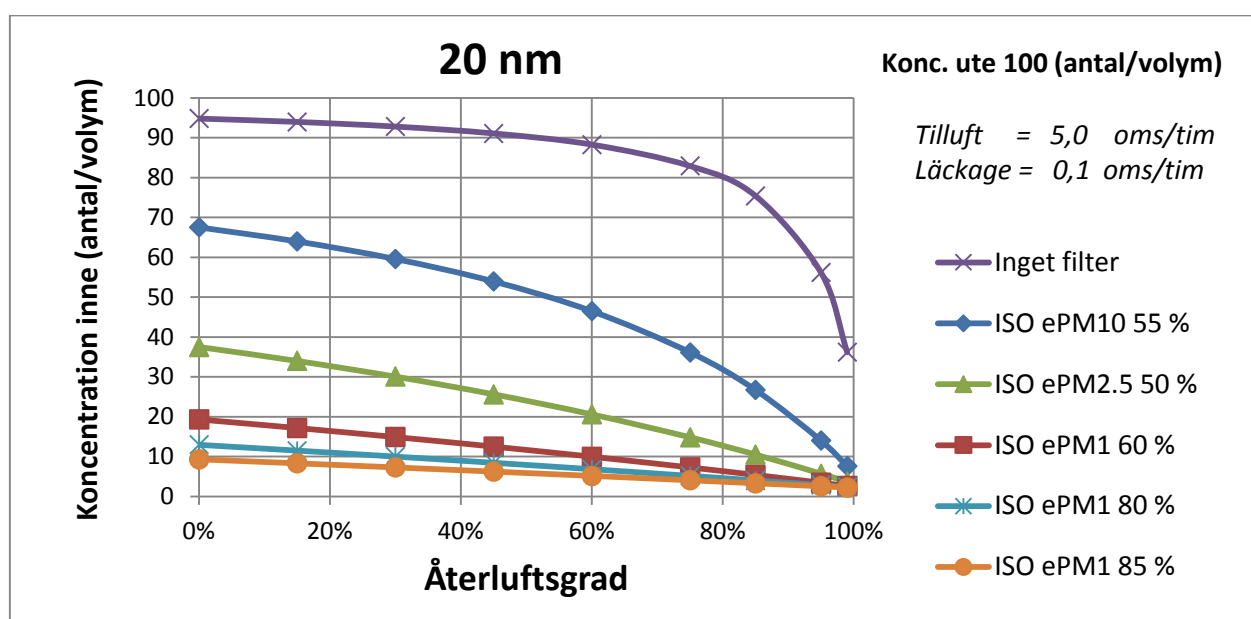
**Figur B7.3** (som Figur B5.3 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 0,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,3 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.



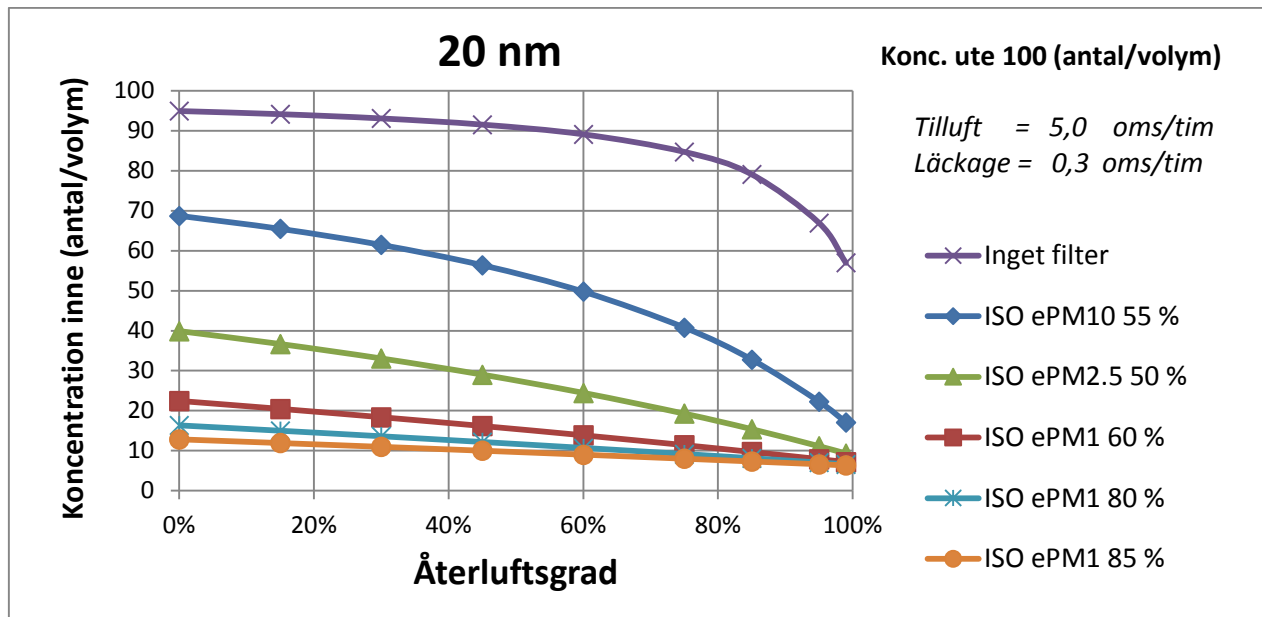
**Figur B7.4** (som Figur B5.4 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 2,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,1 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.



**Figur B7.5** (som Figur B5.5 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 2,5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 h^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,3 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.



**Figur B7.6** (som Figur B5.6 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 h^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,1 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.



**Figur B7.7.** (som Figur B5.7 i Bilaga 5). Partikelkoncentration inne som funktion av återluftsgraden vid ett tilluftsflöde motsvarande 5 luftomsättningar per timma. Partikeldepositionen har satts till  $0,25 \text{ h}^{-1}$  och luftläckaget till motsvarande 0,3 luftomsättningar per timma. Uteluftens partikelkoncentration har satts till 100 partiklar per volymenhet luft.