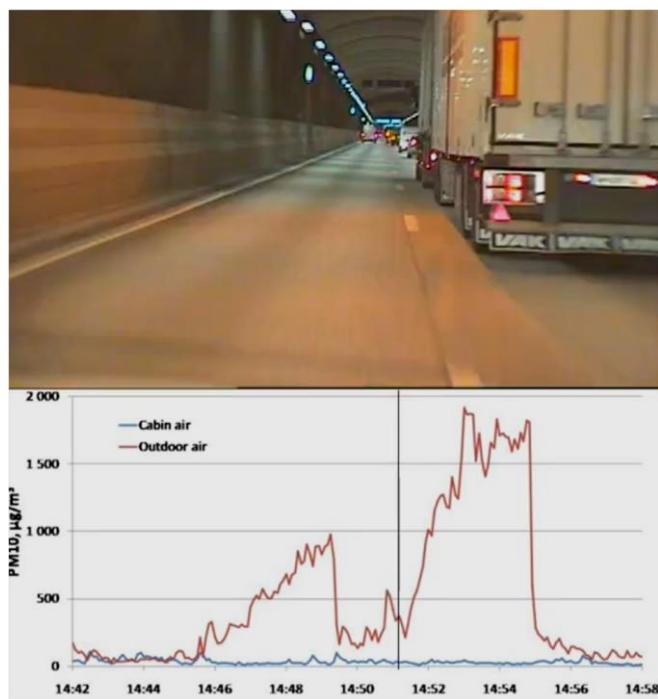


## **Halter av partiklar och NO<sub>x</sub> i fordon i relation till omgivningsluftens halter**

### **Underlag för skattning av trafikantexponering**



Christer Johansson, Sanna Silvergren, Michael Norman,  
Billy Sjövall

Rapport på uppdrag av Trafikverket

# Innehåll

Sammanfattning .....	1
Syfte .....	1
Metoder .....	1
Resultat .....	1
PM10 .....	1
PM2,5 .....	1
Totala antalet partiklar >20 nm .....	2
Sot .....	2
NO <sub>x</sub> .....	2
Litteraturstudie .....	2
Generell modell för skattning av exponering i tunnlar .....	2
Slutsatser .....	3
Summary .....	5
Objectives .....	5
Methods .....	5
Results .....	5
PM10 .....	5
PM2,5 .....	5
The total number of particles> 20 nm .....	6
Soot (Black carbon) .....	6
NO <sub>x</sub> .....	6
Literature Study .....	6
General model for estimation of exposure in tunnels .....	6
Conclusions .....	7
Inledning och syfte med studien .....	9
Genomförande .....	10
Metoder .....	10
Instrument .....	10
Fordon .....	12
Ventilationssystem och filter .....	12
Metodik mobila mätningar .....	13
Metodik fasta mätningar i tunneln .....	14
Körsträckor .....	15

Databearbetning.....	15
Mätningar i och utanför fordonen .....	15
Fasta mätningar i tunneln .....	16
Resultat.....	16
Halter vid de fasta mätningarna i tunneln .....	16
Halter utanför bilen i samband med mätningar inuti fordon .....	21
Förhållanden mellan omgivningshalter och kupéhalter .....	21
PM10 .....	21
PM2,5 .....	25
Partikelantal (>20 nm) .....	27
Sot .....	30
Kväveoxider, NO <sub>x</sub> (NO+NO <sub>2</sub> ).....	31
Kvävedioxid, NO <sub>2</sub> .....	32
Jämförelse av halter i kupéer för olika partikelmått .....	33
Sammanställning av resultat från andra studier .....	34
Partiklar.....	35
Kväveoxider .....	37
Exponering i fordon vid färd i biltunnlar .....	37
Slutsatser .....	41
Referenser .....	42

## Förord

Detta projekt har genomförts av SLB analys i samarbete med Institutionen för tillämpad miljövetenskap (ITM vid Stockholms universitet) på uppdrag av Trafikverket och är ett av flera projekt som ska leda fram till riktvärden för luften i tunnlarna i Förbiart Stockholm och andra tunnlar. Projektledare och kontaktpersoner på trafikverket har varit Marianne Klint (från WSP på uppdrag av Trafikverket, Region Stockholm) och Michelle Benyamine (Trafikverket, Region Stockholm).

Från SLB analys har, förutom rapportförfattarna, även Lars Törqvist medverkat vid mätningar, fotografering, filmning och datapresentation.

ITM har bidragit med mätningar i en lätt lastbil och sotmätningar i tunneln. Arbetet har genomförts av Hans Karlsson, Kai Rosman och Johan Ström.

Speciellt tack riktas till Marianne Klint, Michelle Benyamine och Anna Henstedt (BIL Sweden) för synpunkter på och granskning av rapporten.

Stockholm februari 2013,

Christer Johansson

SLB analys, Miljöförvaltningen Stockholm samt ITM Stockholms universitet

## Sammanfattning

### Syfte

Syftet med detta projekt har varit att kvantifiera förureningshalterna i fordonskupéer i förhållande till omgivande halter utanför fordonen för att kunna uppskatta betydelsen av exponering i vägtrafiktunnlar. Resultaten ska ligga till grund för eventuella nya riktvärden för tunnellsuft och även kunna användas som underlag för analyser av hälsoeffekter av exponering i tunnlar. Projektet har genomförts på uppdrag av Trafikverket och är ett av flera forskningsprojekt som ingår i en övergripande utvärdering av hälsokonsekvenserna i samband med utbyggnad av vägtunnlar, bland annat Förbifart Stockholm.

### Metoder

Mätningarna har innefattat halterna i och utanför fordon av PM10, PM2,5, totala antalet partiklar, sot, kvävemonoxid (NO) och kvävedioxid (NO<sub>2</sub>) (summan av dessa benämns NO<sub>x</sub>). Halterna mättes samtidigt inne i fordon och utanför vid färd. Fem olika fordon har använts för studien: en ny Volvo V70 (tillverkad 2011), Ford Focus (från 2005), Saab 95 (2004), Volkswagen van (2001) och en SL buss, etanol (2007).

Mätningarna i personbilarna genomfördes med ventilation (näst högsta läget med ventilationsluft utifrån) och med re-cirkulation. Dessa lägen antas representera typiska ytterligheter vid färd i tunnel, vad gäller mängden luftföroreningar som tränger in i fordonskupéerna. En litteraturstudie visar också att ventilationen och mängden luftföroreningar som tränger in beror på typ av filter och hur belastat filtret är, men detta har inte undersökts närmare. I alla personbilar fanns också luftkonditionering som var påslagen hela tiden. För bussen och vanen användes inte re-cirkulation, endast ventilation i ett läge.

### Resultat

#### PM10

I ventilationsläget var halterna av PM10 i kupén betydligt lägre än utanför ((2 % - 10 % av halten utanför), vilket tyder på att filtren har bra avskiljningsförmåga i samtliga av de testade bilmodellerna. PM10 halten domineras av de partiklar som är större än 1 µm, vilka kan förväntas avskiljas effektivt av filtren i fordonen. De kan också lätt fastna på vägen i ventilationssystemet främst på grund av deras tröghet (impaktion).

Kupéhalterna och halterna utanför fordonen var överlag ganska bra korrelerade då ventilationen var påslagen (förklaringsgraden,  $r^2$ , var mellan 0,51 och 0,91 för personbilarna och 0,50 för SL bussen). Kupéhalterna är betydligt lägre vid re-cirkulation än vid ventilation för alla testade fordonsmodeller. Halterna i kupén var mer eller mindre oberoende av halterna utanför fordonen vid re-cirkulation ( $r^2$  mellan 0,22 och 0,29 för personbilarna).

#### PM2,5

För PM2,5 uppmätttes lägst halter i Volkswagen vanen samt Volvon i relation till halterna utanför fordonen. Halterna i kupéerna var mellan 5 % och 22 % av halterna utanför bilkupén för de testade fordonen då ventilationen är påslagen.

Förklaringsgraden,  $r^2$ , var högre än motsvarande för PM10 för alla testade fordon utom Volvon och SL-bussen. Ett högt  $r^2$  är att förvänta om en stor del av föroreningarna utanför fordonen tränger in i kupéerna. Men precis som för PM10 påverkades knappt halterna i kupén av halterna utanför då re-cirkulationen var påslagen.

#### Totala antalet partiklar >20 nm

Antalet partiklar som finns inuti bilen respektive utanför bilen korrelerar mycket väl för alla studerade bilar vid ventilationen påslagen, men något sämre för SL-bussen.

Antalskoncentrationen av partiklar i fordonen var mellan 41 % och 52 % av antalet utanför. Liksom för PM10 hade Volvon bäst filtreringsförmåga och Forden minst. Vid re-cirkulation noterades däremot avsevärt lägre halter av antal partiklar inuti bilarna; enstaka procent av halten utanför.

I bussen uppmätttes halter som var 11 % av halterna i luften utanför och ett visst bidrag från interna källor kunde noteras.

#### Sot

Sothalter har uppmätts i och utanför Volvon och SL-bussen. Sothalten var 41 % av halten utanför Volvon med ventilationen påslagen. Sothalten i kupén var mycket låg vid re-cirkulation och verkar inte påverkas av sothalten utanför. Inuti bussen var halten sot 23 % av den utanför.

#### NO<sub>x</sub>

Mätningarna med ventilation, visade att halterna av NOx inuti Volvon korrelerade väl med halterna utanför ( $r^2 = 0,84$ ). I genomsnitt var kupéhalten 77 % av halten utanför bilen.

#### Litteraturstudie

Inom ramen för detta projekt har vi gjort en sökning bland den vetenskapliga litteraturen och det finns ett stort antal studier där man rapporterar mätningar av halterna i fordon. Tyvärr är det väldigt få som relaterar halterna till de omgivande halterna. Några har jämfört halterna i fordon med halterna längs gång- och cykelvägar. I de flesta relevanta studierna har man mätt ultrafina partiklar, som utgör mer än 90 % av det totala partikelantalet i trafikmiljöer. Studierna visar på stora skillnader i kvoterna mellan halterna i fordon och utanför (I/O); mellan 0,03 och 1,04. Ventilationen har stor betydelse; re-cirkulation gav lägst kvot, d v s minst påverkan av utomhushalterna på halterna i fordonskupén. Nyare fordon tenderar att ha lägre kvoter än äldre men det finns undantag. Prestanda på luftfilter, dess ålder och lufthastigheten genom filtret har visat sig påverka filtreringseffektiviteten. Likaså kan undertrycket i fordonskupén påverka kvoten I/O. För de minsta (<0,1  $\mu\text{m}$ ) samt de största partiklarna (2,5-10  $\mu\text{m}$ ) varierade filtreringskapaciteten mellan ca 25-80 % respektive 30-80 %. Generellt gäller att filtreringen av grova partiklar mellan 2,5 och 10  $\mu\text{m}$  är effektiv, medan filtreringen av antalet partiklar och sotpartiklar är minst effektiv.

#### Generell modell för skattning av exponering i tunnlar

Halterna av föroreningar i tunnlar (utanför fordonskupén) kan uppskattas med kännedom om antal fordon, typ av fordon, vägbanelutningen, fordonshastigheten, tunnelventilationen, beläggningstypen och dubbdäcksanvändningen. Exponeringen för

luftföroreningar vid färd genom vägtunnlar beror sedan av vistelsen inne i tunneln, fordonsventilationen, filtreringseffektiviteten och volymen av fordonskupén (fordonsstorleken). Den senare påverkar omsättningstiden för luften i fordonskupén. Om omsättningstiden är lång kommer en mindre mängd föroreningar från tunnelluftens in i kupén under färd i en kort tunnel, men samtidigt sker utvädringen av föreningarna längsammare då fordonet passerat ut ur tunneln om ventilationen inte ändras efter passagen av tunneln.

Med kännedom om filtreringseffektiviteten och omsättningstiden kan halterna i fordonskupén uppskattas. Beräkningar visar att omsättningstiden kan ha stor betydelse för den genomsnittliga halten i ett fordon som färdats genom en tunnel beroende på tunnellängden och hur snabbt fordonet ventileras efter passagen av tunneln. Detta kan vara speciellt betydelsefullt att ta hänsyn till för de bussar som ska trafikera olika delar av tunneln som hör till Förbifart Stockholm.

### Slutsatser

Utifrån mätningarna i Södra länken tunneln och mätningar som rapporterats i andra studier, kan följande generella slutsatser dras vad gäller partikel och sothalter i fordonskupéer och hur de relaterar till halterna utanför fordonen:

- Påverkan på partikelhalterna inuti fordonen med **re-cirkulation** är mycket liten, knappt mätbar.
- Med **ventilationen påslagen** är påverkan på partikelhalten inne i fordonen av halten utanför beroende på vilket partikelmått som studeras.
  - Generellt kommer endast en liten andel av den största ( $>1 \mu\text{m}$ ) och allra minsta ( $<0,05 \mu\text{m}$ ) partikelfraktionerna av PM10 in i fordonskupén eftersom de fastnar i filter och ventilationssystem. Partiklar med en diameter däremellan har större sannolikhet att tränga in i kupén.
  - Om PM10 domineras av grova partiklar (uppvirvat vägdamm eller partiklar från dubbdäcksslitage, som är fallet under senvintern/våren i Stockholm) blir påverkan på halterna av PM10 i fordonskupén liten. I denna studie var halterna inne i fordonen mindre än 10 % av halterna utanför, även med ventilationen på 75 % av maximal ventilation.
  - För PM2,5 är påverkan på halterna större än PM10, eftersom partiklar  $<2,5 \mu\text{m}$  har större sannolikhet att ta sig in i fordonskupén jämfört med de som är större. I denna studie var halterna inne i fordonen mindre än 25 % av halterna utanför.
  - För Volvon med det modernaste ventilationssystemet av de studerade fordonen uppmättes att sothalterna i fordonskupén var 41 % av halterna utanför. För de äldre fordonen, Saaben och Forden, uppskattas att halterna var ca 50 % av halten utanför kupén.
  - Om man mäter antalet partiklar så domineras de ofta av de allra minsta partiklarna som har något mindre sannolikhet än sotpartiklarna att ta sig in i fordonskupén. I denna studie var halterna av antalet partiklar ( $>20 \text{ nm}$ ) mellan 40 % och 50 % av halterna utanför fordonen.

- Fordonsmodell, fordonstyp och ålder på fordonen har stor betydelse för i vilken grad omgivningshalterna påverkar halterna inne i fordonen.
  - Utifrån litteraturen kan det konstateras att det finns en viss tendens att senare årsmodeller har lägre halter av ultrafina partiklar inne i fordonen i relation till utanför, men det finns undantag. Sökning i databaser för vetenskaplig litteratur visar dock att det är ganska få studier där man kan relatera halterna i fordonen till halterna utanför.
  - Vår studie visar att den nya Volvon har lägre halter inne i kupén än de äldre personbilarna och en viktig orsak är sannolikt det speciella ventilationssystemet i Volvon, med relativt effektivt filter och avkänning av halterna av gasformiga förureningar i ventilationsluften.
  - Påverkan av de höga tunnelhalterna på halterna inuti SL bussen var relativt måttlig. Den långa luftutbytestiden av den stora volymen i bussen har sannolikt stor betydelse för halterna i bussen.

Vad gäller NO<sub>x</sub> var halterna i Volvon nästan lika hög som i tunneln med ventilationen påslagen (75 % av maximal ventilation). Tyvärr gav mätningar av NO<sub>x</sub> halterna med re-cirkulation inga användbara resultat, men eftersom det inte finns någon källa för NO<sub>x</sub> inuti fordonen så måste NO<sub>x</sub> och NO<sub>2</sub> halterna vara väsentligt lägre med re-cirkulation jämfört med ventilation.

## Summary

### Objectives

The purpose of this project was to quantify the concentration of pollutants in vehicle cabins relative to ambient levels outside the vehicles in order to assess the importance of exposure in road tunnels. The results will form the basis for new guidelines for the tunnel air and also be used as a basis for analysis of the health effects due to air pollution exposure of drivers in road tunnels. The project is one of several research projects as part of an overall evaluation of the health impacts associated with the construction of the road tunnels associated Stockholm Bypass. It has been financed by the Swedish Transport Administration.

### Methods

Measurements have included concentrations inside and outside the vehicle of PM10, PM2,5, total number of particles, soot, nitrogen monoxide (NO) and nitrogen dioxide (NO<sub>2</sub>) (the sum of these is called NO<sub>x</sub>). Five vehicles were used for the study: a new Volvo V70 (manufactured in 2011), Ford Focus (2005), Saab 95 (2004), Volkswagen van (2001) and a bus, ethanol (2007). The measurements were performed with ventilation (the second highest position of the ventilation air from the outside) and with recirculation. These modes are assumed to represent typical extremes while driving in tunnels. The ventilation affects the amount of air pollution entering the cabin and also the exchange time of the air. For concentrations inside the bus, the long exchange time of the air is of great importance.

## Results

### PM10

In ventilation mode, considerably lower concentrations of PM10 were seen in the cabin than outside ((2% - 10% of the levels outside) in all of the tested car models. The PM10 concentration was dominated by the particles larger than 1 µm, which can be expected to be separated efficiently by the filters in vehicles. They can also easily get caught in the ventilation system, mainly due to their inertia (impaction). Cabin concentrations and the concentrations outside the vehicles were overall well correlated when ventilation was switched on (coefficient of determination,  $r^2$ , between 0.51 and 0.91 for cars and 0.50 for the bus). Cabin concentrations were significantly lower in the re-circulation mode compared to ventilation for all tested vehicles. Concentrations in the cabin was more or less independent of the levels outside the vehicle when recirculation ( $r^2$  between 0.22 and 0.29 for passenger cars).

### PM2,5

For PM2,5 the lowest levels were seen in the Volkswagen van and Volvo in relation to levels outside the vehicles. Concentrations in the compartments were between 5 % and 22 % of the levels outside the vehicle interior for the tested vehicles when ventilation was on. The coefficient of determination was higher than that of PM10 for all tested vehicles except Volvo and SL-bus. A high  $r^2$  is to be expected if a large portion of the impurities outside the vehicles entering the compartments. But similar to PM10,

concentrations outside barely affected the interior levels when the re-circulation was turned on.

#### The total number of particles > 20 nm

The number of particles found inside the car and outside the car correlated very well for all tested cars in the ventilation mode, but slightly worse for bus. The number concentration in the vehicles was between 41 % and 52 % of that outside. As for PM10 Volvo had the best filtering efficiency and Ford the worst. With recirculation considerably lower levels were seen in the cabins. For the bus concentrations were 11 % of the levels in the air outside, and some contribution from internal sources was noted.

#### Soot (Black carbon)

Soot has only been measured in the Volvo and in the bus. The concentration was 41 % of that outside the Volvo in the ventilation mode. With re-circulation, the cabin concentration was very low and not much affected by the concentration outside. The concentration inside the bus was 23% of that outside with ventilation on.

#### NO<sub>x</sub>

The measurements showed that the levels of NO<sub>x</sub> inside the Volvo correlated well with levels outside ( $r^2 = 0.84$ ). On average, the cabin concentration was 77 % of that outside the car.

#### Literature Study

Within the framework of this project, we conducted a search in the scientific literature and there are a large number of studies that report measurements of concentrations in vehicles. Unfortunately, there are very few that relate levels to the surrounding levels. Some have compared the concentrations in vehicles with levels along footpaths and cycle paths. In the most relevant studies, ultrafine particles have been measured. They constitute more than 90 % of the total particle number of traffic environments. Often inside/outside ratio is reported (I/O). The studies show large differences in I/O ratios, between 0.03 and 1.04. Ventilation is very important; recirculation gave the lowest ratio. Newer vehicles tend to have lower ratios than older, but there are exceptions.

Performance of air filters and its age has been shown to affect the I/O ratio. For the ultrafine particles (<0.1 μm) and the coarse particles (2.5-10 μm) filtration efficiencies are in the range 25-80% and 30-80 %, respectively. Generally, the filtration of coarse particles is effective, while the filtering of the number of particles and carbon particles is less effective.

#### General model for estimation of exposure in tunnels

The concentrations of pollutants in the tunnels (outside the vehicle compartment) can be estimated with knowledge of the number of vehicles, type of vehicles, slope of the road, vehicle speed, tunnel ventilation, pavement type, and the use of studded tires. Exposure to air pollution when driving through tunnels depends on the travel time inside the tunnel, vehicle ventilation, filtration efficiency and volume of passenger compartment (vehicle size). The latter affects the turnover time of the air in the vehicle. With long compared to short turnover time, less pollution from the tunnel air will penetrate into the cabin while driving in a short tunnel, but at the same time ventilation of polluted air

is slower when the vehicle has passed out of the tunnel if ventilation is not changed after the passage of the tunnel.

With knowledge of filtration efficiency and turnover time, the levels inside the vehicle can be estimated. Calculations show that the turnover time can be very important for the average content of a vehicle traveling through a tunnel, depending on the tunnel length and the rate of ventilation of cabin air after the passage of the tunnel. This may be particularly important to consider for the buses that run on different parts of the tunnel of the Stockholm Bypass.

### Conclusions

The following conclusions can be drawn for particle and soot concentrations in the cabin of vehicles and the relation to the concentration outside the vehicles based on measurements in the Södra länken tunnel and measurements in other studies:

- The influence on particle concentrations in vehicles during **re-circulation** of air is very small, barely detectable.
- The particle concentration inside the vehicles depends of the specific particle quantity that is studied when **ventilation is switched on**.
  - Only a small fraction of the largest ( $>1 \mu\text{m}$ ) and the smallest ( $<0.05 \mu\text{m}$ ) PM10 particles enter the vehicle cabin as they are caught in the filter and the ventilation system. Particles with a diameter in-between are more likely to penetrate into the cabin.
  - The impact of outdoor PM10 on the vehicle cabin is small if PM10 is dominated by coarse particles (suspended road dust or particles from studded tire wear, which is the case during late winter/spring in Stockholm). The particle concentrations inside vehicle cabins were less than 10 % of the outside concentration in this work.
  - The impact of PM2,5 is larger than for PM10 because particles  $<2.5 \mu\text{m}$  have a higher probability to enter the vehicle cabin compared to the larger particles. The particle concentrations were less than 25 % of the outside concentration in this study.
  - Soot concentrations in the cabin were 41 % of the outside concentration for the Volvo with the most modern ventilation system of the studied vehicles. The soot concentration may be higher for older vehicles (or vehicles with a less advanced filter)
  - The number of particles, which are dominated by the very smallest particles ( $<0.1 \mu\text{m}$ ), are slightly less likely than the soot particles to penetrate in to the vehicle cabin. The particle number concentration ( $>0.020 \mu\text{m}$ ) was between 40 % and 50 % of the concentration outside the vehicles in this study.
- The vehicle model, vehicle type, and the age of the vehicle have major impact on the degree of influence that the surrounding concentrations have on the concentrations inside the vehicle.

- Based on the literature it can be concluded that there is a tendency for newer model year cars to have lower concentrations of ultrafine particles inside the vehicles in relation to the outside concentration, but there are exceptions. Searches in data bases for scientific literature show, however, that there are relatively few studies where the cabin concentration is related to the concentration directly outside the vehicle.
- Our study shows that the new Volvo has lower concentrations in the cabin than the older private cars and an important cause is likely the special ventilation system in the Volvo, with a relatively efficient filter.
- The impact of the high tunnel concentrations on the concentration inside the bus was relatively moderate. The long air exchange time of the large bus volume is likely to be of importance for the bus-cabin concentrations.

In terms of NO<sub>x</sub>, measurements in the Volvo showed that the concentrations in the vehicles can be almost as high as in the tunnel with the ventilation switched on (75 % of maximum ventilation). Unfortunately, measurements of NO<sub>x</sub> inside the Volvo with re-circulation showed strange results, but since there is no NO<sub>x</sub> source inside the car cabin concentrations of both NO and NO<sub>2</sub> should be much lower with re-circulation.

## Inledning och syfte med studien

För många människor i storstäder utgör exponeringen i trafikmiljön en betydande del av den totala exponeringen för luftföroreningar (t ex Hänninen et al. 2004; Johansson & Eneroth, 2007; Johansson et al., 2008). Tunnlar för vägtrafiken kan minska den allmänna befolkningens exponering, men samtidigt måste halterna inne i tunnlarna kontrolleras så att trafikanterna inte utsätts för hälsovådliga nivåer. Med allt fler och längre tunnlar i Stockholm kan exponeringen i fordon komma att öka, både för yrkesförare och för privatpersoner, speciellt de som pendlar med bil. Tunnelluftens innehåller en mycket komplex blandning av gasformiga och partikelburna luftföroreningar, som har väldigt olika kemiska och fysikaliska egenskaper. En viktig fråga är hur halterna i tunnelluftens påverkar halterna inne i fordonskupéerna.

Exponeringen för luftföroreningar vid färd genom vägtunnlar beror av en rad faktorer:

- Vistelsen inne i tunneln som påverkar dosen som personer utsätts för
- Fordonsventilationen, typen av filter och avstånd mellan fordon mm., dvs. faktorer som påverkar mängden föroreningar som tränger in i fordonskupén
- Faktorer som påverkar avgasemissionerna från fordonen och därmed halterna i tunnelluftens: antal fordon, typ av fordon, lutningen, fordonshastigheten och tunnelventilation
- Faktorer som påverkar mängden slitagepartiklar från vägbanan (beläggningstyp och dess slittålighet, vägbaneförhållanden, andel av olika däckstyper, fordonshastigheter och trafikförhållanden)

Utsläppen från olika fordonstyper är olika för olika ämnen och mängden som tränger in i fordonskupéerna kan vara olika beroende på hur effektivt ämnena fastnar i fordonens ventilationssystem (t ex beroende på kupéfilter). Detta påverkar i sin tur valet av förorening(ar) som bör mätas vis kontroll av luftkvaliteten i tunnlar och även vid dimensionering av ventilationen i tunnlar. Givetvis måste man då beakta även de potentiella hälsoriskerna av den förhöjda exponeringen, men också mättekniska aspekter.

Detta projekt har genomförts på uppdrag av Trafikverket och är ett av flera projekt som ska leda fram till riktvärden för luften i tunnlarna i Förbifart Stockholm och andra biltunnlar. En stor del av Förbifart Stockholm, 18 av ledens 21 kilometer, kommer att gå i tunnel. I dagsläget finns det brister i kunskapen om vad exponeringen för de höga halterna i tunnlar innebär ur ett hälsoperspektiv. Det finns inte heller några EU-direktiv som reglerar värden för tunnellsuft och miljökvalitetsnormerna för luft gäller bara för utomhusluft. I denna rapport presenteras resultat från mätningar av halterna av partiklar och NO<sub>x</sub> i och utanför fordon.

Syftet är att kvantifiera betydelsen av tunnlar för totala exponeringen med hänsyn till förhållandena i tunnlarna. Resultaten ska kunna användas som underlag både för analyser av hälsoeffekter av exponering i tunnlar och för beslut om gränsvärde/riktvärde för tunnellsuft.

## Genomförande

Mätningar genomförs i och utanför olika typer av fordon (personbilar, skåpbil och buss) vid färd genom tunnlar. I och utanför fordon mäts halterna av:

- NO<sub>x</sub>
- Sot (black carbon)
- PM10
- Sex partikelfraktioner inklusive PM2,5
- Antal partiklar

Halterna har relaterats till befintliga mätningar av PM10, NO<sub>x</sub>, trafikflöden, ventilation mm i tunnlar i Stockholm. De flesta mätningar har genomförts i Södra länken tunneln där det finns befintliga PM10, NO<sub>x</sub> och CO mätningar på ett antal platser.

Halterna i och utanför fordonen har också relaterats till halterna vid fasta mätstationer i tunneln. Baserat på dessa relationer och emissionsfaktorer för en framtid fordonspark (avgasemissioner och slitagegenererade emissioner) kan exponering och dos i framtid tunnelar uppskattas. Mätningarna har genomförts av SLB analys vid Miljöförvaltningen i Stockholm i samarbete med Institutionen för tillämpad miljövetenskap (ITM) vid Stockholms universitet.

## Metoder

### Instrument

Instrumenten som användes för att ta fram data till denna rapport är listade i Tabell 1. Där ges även en kortfattad beskrivning av mätprinciperna. I vissa fall användes olika instrument under de mobila respektive de fasta mätningarna. Detta eftersom mindre instrument är mer praktiskt för de mobila mätningarna medan de större instrumenten generellt är mer robusta och kan användas längre perioder utan underhåll.

Under mobila mätningarna mätttes partikelantal och partikelstorleksfördelning med Lighthouse och P-TRAK. Sothalterna mätttes med micro-Aethalometer. NO<sub>x</sub> halterna mätttes med Environment S.A. För de fasta mätningarna användes TEOM för mätningar av PM10, CPC för partikelantal, PSAP för sot samt ett NO<sub>x</sub>-instrument med samma detektionsteknik som Environnement S.A.

Regelbundna parallellkörningar gjordes med partikelinstrumenten för att säkerställa jämförbarheten. Partikelinstrumenten kontrolleras även regelbundet genom att ett filter placeras på luftinsuget för att registrera att koncentrationen då är noll.

NO<sub>x</sub> instrumenten kalibrerades med en gascylinder innehållande en känd blandning av kvävemonoxid i luft samt med en ozontitreringsteknik för att erhålla konverteringsgraden för konvertern som reducerar kvävedioxid till kvävemonoxid.

Tabell 1. Mästinstrument som används i studien och deras användningsprincip.

Mätparametrar	Instrument	Mätprincip
PM10	Thermo SCIENTIFIC TEOM (Series 1400ab)	Gravimetrisk metod där man i TEOM (Tapered Element Oscillating Microbalance) –instrumentet avskiljer partiklarna på ett filter placerat på toppen av en oscillerande glaskropp. Frekvensen hos den ihåliga glaskroppen förändras proportionellt med massförändringen på filtret.
NO och NO <sub>2</sub>	Environnement S.A (AC31M-LCD)	Kemiluminescensmetoden. Utnyttjar den snabba reaktionen mellan NO och ozon (O <sub>3</sub> ), vilket sker under kemiluminescens. Ljusmängden är proportionell mot NO-halten och kan mätas med stor noggrannhet.
Massan av partiklar i 6 fraktioner	Lighthouse Worldwide Solutions	Optiskmetod där instrumentet använder en laserdiokälla för optisk detektion av partiklar. Partiklarna sprider ljuset från laserdioden olika mycket beroende på partikelstorlek. Ljuset samlas in och fokuseras optiskt på en fotodiode som konverterar skuren av ljus till elektriska pulser. Pulserna räknas (antal partiklar) och dess amplitud är ett mått på partikelstorleken. För att räkna ut masskoncentrationen antas en partikeldensitet och refraktion. Genom summering av masskoncentrationen för alla fraktioner mindre än den angivna fraktionen erhålls masskoncentrationen av fraktionen. Med PMX.Y avses massan av alla partiklar mindre än X,Y $\mu\text{m}$ .
PM0.5 <sup>1</sup>	HANDHELD 3016	
PM1 <sup>1</sup>	IAQ	
PM2.5		
PM5 <sup>1</sup>		
PM10		
TPM <sup>1</sup>		
Antalet fina partiklar (>20 nm)	TSI P-TRAK Modell 8525	Optiskmetod där instrumentet använder en laserkälla för optisk detektion av partiklar. Iso-propanol kondenserar på partiklarna som samlats in i instrumentet. Partikelstorleken ökar därmed och då dessa droppar passeras en laserstråle sprider varje droppe ljus på en närliggande fotodiode. Signalerna räknas och visas i antal partiklar/cm <sup>3</sup> .
Antalet fina partiklar (>6 nm)	CPC 3022	Fungerar enligt ovanstående beskrivning av TSI P-TRAK men använder N-butanol som kondenserande alkohol.
Sot ("Black Carbon")	Magee Scientific microAethalometer Modell AE51	Optiskmetod där instrumentet använder en 880 nm LED-ljuskälla och en dioddetektor för optisk detektion av transmission genom ett filter. Skillnaden i ljusabsorbans (attenuation, ATN) av filtret mäts med varje föregående mätpunkt som referens. ATN omvandlas sedan till en masskoncentration av BC uttryckt i mikrogram per kubikmeter ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ) med hjälp av en känd optisk absorbans per massenhets "Black Carbon" material.
Sot ("Black Carbon")	PSAP (Particle Soot Absorption Photometer) Byggd av ITM, Stockholms Universitet	Optiskmetod där instrumentet använder en 525 nm LED-ljuskälla och för detekterar transmission genom ett filter. Instrumentet använder en referenspunkt på filtret. Absorption bestäms som skillnaden mellan ljusutrotning och ljusspridning genom oförändrade partiklar (referensen). Omvandlingen till masskoncentration sker på samma sätt som för microAethalometern ovan.

<sup>1</sup> Ingår inte i uppdraget att mäta dessa parametrar.

## Fordon

Fem olika fordon användes. Dessa är listade i Tabell 2. Det är tre personbilar med olika tillverkare och tillverkningsår, en skåpbil samt en buss. Bussen används i trafik av Storstockholms lokaltrafik.

Tabell 2. De olika fordonen som användes i denna studie.

Bilmodell	Tillverkningsår
Volvo V70	2011
Ford Focus, flexifuel (etanol/bensin)	2005
Saab 95	2004
Volkswagen LT TDI Van	2001
SL-buss Scania (1,765 ton, 12 meter), etanol	2007

## Ventilationssystem och filter

De olika fordonens ventilationssystem med tillhörande luftfilter och luftkonditioneringssystem kan ha avgörande betydelse för halterna inne i fordonskupéerna jämfört med utanför. Tyvärr har det inte varit lätt att få fram information om vad som sitter i fordonen.

Luftfiltret i den nya Volvo V70 har (enligt Volvo) två funktioner, ett rensar bort partiklar och ytterligare ett är impregnerat med aktivt kol som kan absorbera gasformiga luftföroreningar. Kupéluften i bilen övervakas av ett luftkvalitetssystem som mäter vissa gasformiga luftföroreningar i den inkommande luften. Enligt specifikationen stängs luftintaget till kupén av helt automatiskt långt innan halterna blir för höga och utan att föraren behöver trycka på någon knapp. Volvos produktspecifikation anger att mer än 90 % av de största partiklarna av PM10 (>1 µm) tas bort i filtret, men för de mindre, t ex de med en diameter på 0,3 µm så är avskiljningsgraden ca 35 % (Tabell 3).

Tabell 3. Filterspecifikationer för Volvo V70.

Parameter	Börvärde	Uppmätt enligt Volvos test
Partiklar, 0,3 µm	>35% reningsgrad	35% <sup>1</sup>
Partiklar, 0,5	>80% reningsgrad	88% <sup>1</sup>
Partiklar, 1 µm	>90% reningsgrad	92% <sup>1</sup>
Partiklar, 5 µm	>95% reningsgrad	98% <sup>1</sup>
Partiklar, >5 µm	>98% reningsgrad	99% <sup>1</sup>
Kvädedioxid, NO <sub>2</sub> :		
0 s	<5% genomsläppighet	3,8% genomsläppighet <sup>2</sup>
300 s	<10% genomsläppighet	4,5% genomsläppighet <sup>2</sup>

<sup>1</sup> Prüfberichtung des partikelfilters 44 033 56 350 gemäss der Behr-Spezifikation AA.05207.

<sup>2</sup> Prüfung des kombifilters 44 033 56 300 gemäss der Behr-Spezifikation AA.05206.

### Metodik mobila mätningar

Ett av varje instrument har sitt insug utanför respektive inuti fordonet. Insuget inuti fordonen placerades i andningshöjd vid föraren medan det utanför sticker ut genom rutan vid baksätet (Figur 1). Genomföringen tätades med tejp. För Volvon och Volkswagen-vanen gjordes ett flertal körningar vid olika tillfällen för att säkerställa reproducerbarheten i resultaten. Reproducerbarheten är framförallt viktig för att säkerställa att den mänskliga faktorn och instrumentens dagsform inte inverkar stort på resultaten. Det är även värdefullt att täcka ett ordentligt spann av halter för att med bättre underlag kunna härleda sambandet mellan kupé- och tunnelhalter. Därmed har Volvon körts flera olika dagar, tider och under olika perioder på året. På så vis har halterna av de olika parametrarna varierat mellan mätningarna. Filtret i micro-Aethalometrarna byttes ut mellan körningarna. Minst två och upp till sex passager genom tunneln har gjorts för varje ventilationsinställning vid varje körtillfälle. Variationerna i resultaten redovisas i spridningsdiagramm som visar hur stor del av variationen i halterna i fordonen förklaras av halterna utanför fordonen (se nedan).

Mätningarna genomfördes med ventilationen påslagen i läget för ca 75 % av maximal ventilation samt med re-cirkulation. Det antas inte så sannolikt att fordon framförs i en lång tunnel med maximal ventilation påslagen. Mellan 2 och 3 personer färdades i fordonen under mätningarna.



Figur 1. Placering av instrument och insug i Volvo V70.

I SL-bussen satt det yttre insuget mellan det mittre dörrparet. Det inre insuget monterades i mitten av bussen (Figur 2). Mätningar med bussen genomfördes vid två tillfällen. Endast personal ansvariga för mätningarna (4 personer) och föraren färdades i bussen under mätningarna.

Precis som för personbilarna var ventilationen i läget motsvarande ca 75 % av maximal ventilation. I ventilation.

Tabell 4 visas vid vilka datum som de olika fordonen testades i tunneln. De flesta mätningarna har genomförts i Volvon eftersom den är av senaste årsmodell och antagligen bäst representerar framtidens fordonspark, kanske åtminstone år 2020.

Tabell 4. Datum under 2012 för de olika körningarna i Södra länken med fordonen.

Bilmodell	15- mar	21-mar	29-mar	9-maj	24-okt	13-dec
Volvo						
Ford	16-apr					
Saab	3-apr					
VW	22-mar	28-mar				
SL-buss	5-nov	3-dec				



Figur 2. Insug och instrument för mätningar av luftföroreningar inuti och utanför bussen.

### Metodik fasta mätningar i tunneln

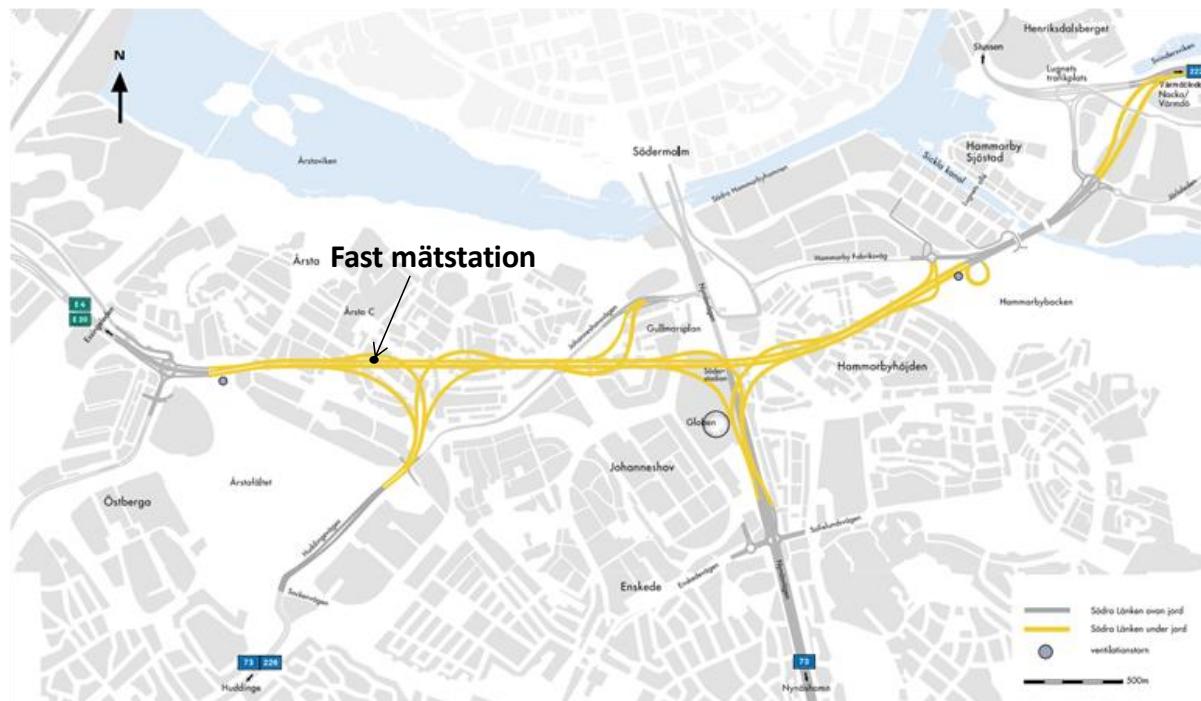
Trafikverket gör kontinuerliga mätningar av PM10, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> samt CO i Södra länken. Kväveoxider och kolmonoxid används bland annat för att styra fläktsystemet och mäts därför på flertalet plaster i tunnel. Halterna av PM10 mäts med TEOM instrument på två platser, en i vardera tunnelrör och relativt nära utfarterna ur tunneln. De både

PM10 stationerna benämns Årsta (tunnelrör för trafik västerut) och Hammarby (tunnelrör för trafik österut). I denna rapport redovisas endast de uppmätta halterna vid mätstationen i Årstatunneln.

Som komplement till de fasta mätningarna har det under en kortare period (28 sep till 4-nov) även gjorts mätningar av antal partiklar och sot vid mätstationen vid Årsta (Figur 3).

## Körsträckor

Tunnelmätningarna inuti och utanför de olika fordonen genomfördes i Södra Länken, som kan ses i Figur 3. Sträckan som kördes var mellan från mynningen i Årsta mot mynningen i Hammarby och i motsatt riktning. Mätningarna inkluderade även vägar i ytläge.



Figur 3. Södra Länkens sträckning. Gul linje representerar tunnel och grå linje går ovan jord.

## Databearbetning

### Mätningar i och utanför fordonen

Mätvärdena för antalskoncentration samt partikelkoncentration inklusive standardavvikelse medelvärdesbildades till 60 sekunder, förutom i slutet av tunnelfärden då medelvärde har bildats av den tid som bilen befinner sig i tunneln, dock för minst 15 sekunder. Sotmätningarna har 60 sekunders upplösning.

I tidigare, liknande studier har en fördröjning på upp till 200 sekunder för halter inuti personbil jämfört med utanför fordonet observerats (Bigazzi och Figlizzzi 2012; Xu and Zhu, 2009; Zhu et al., 2007). Detta beror på hur snabbt luften omsätts i fordonskupén, vilket i sin tur beror på fordonets ventilation, men även fordonets hastighet kan påverka. Fördörjningen av lufthalten inne i kupén jämfört med utanför fordonen har utvärderats för denna studie och mätdata har justerats enligt följande: SL-buss - 90 sekunder; VW LT TDI - 60 sekunder; Ford Focus - 20 sekunder; Saab 9-5 - 10 sekunder; Volvo V70 - sågs ej tydlig fördörjning (<5 s). Denna justering har enbart gjorts för data då ventilationen är påslagen och inte vid re-cirkulation av luft. För sotmätningarna, som endast har 60 sekunders upplösning, justerades halten inuti SL -buss med 120 sekunders fördörjning.

### Fasta mätningar i tunneln

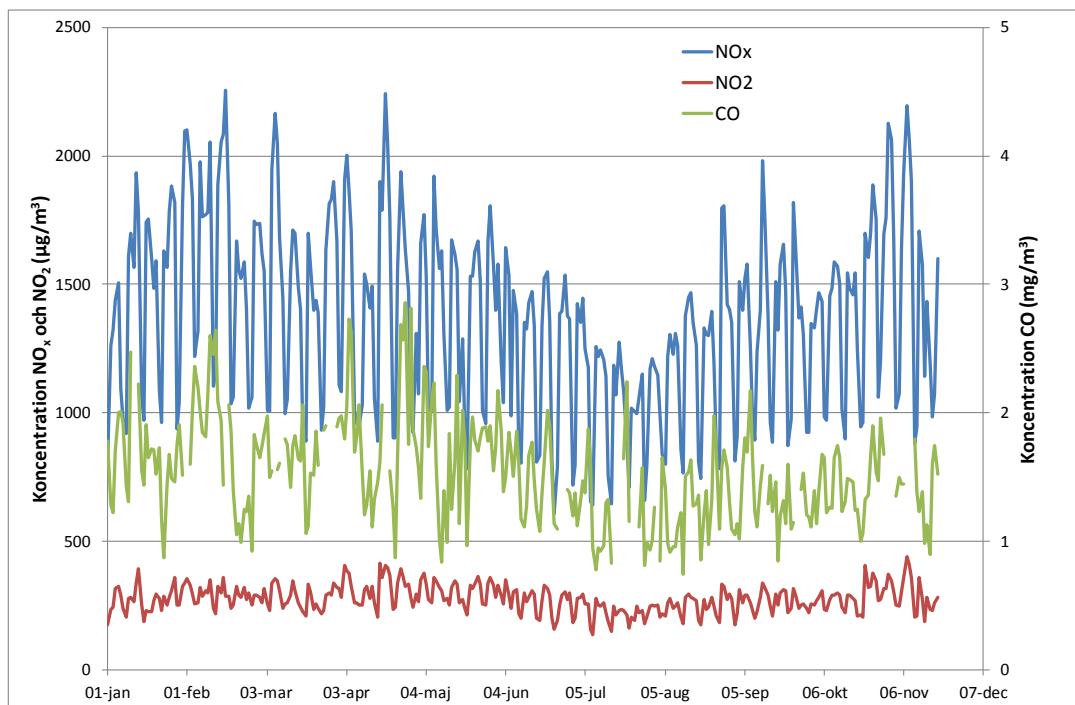
För de fasta mätningarna rapporterade mätinstrumenten ett mätvärde varje kvart, vilka sedan i databasen räknas om till timmedelvärdet.

## Resultat

### Halter vid de fasta mätningarna i tunneln

Halterna av PM10, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> och CO mäts kontinuerligt av Trafikverket i Södra länken. I Figur 4 visas dygnmedelhalterna av NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> och CO vid mätstationen i Årstatunneln. En tydlig skillnad mellan vardagar och helgdagar finns vilket beror på variationen i trafikflödet. Halterna är lägre under sommaren till följd av det lägre trafikflödet.

Medelvärdena under nästan hela 2012 är 1370 µg/m<sup>3</sup> för NO<sub>x</sub> och 276 µg/m<sup>3</sup> för NO<sub>2</sub>.



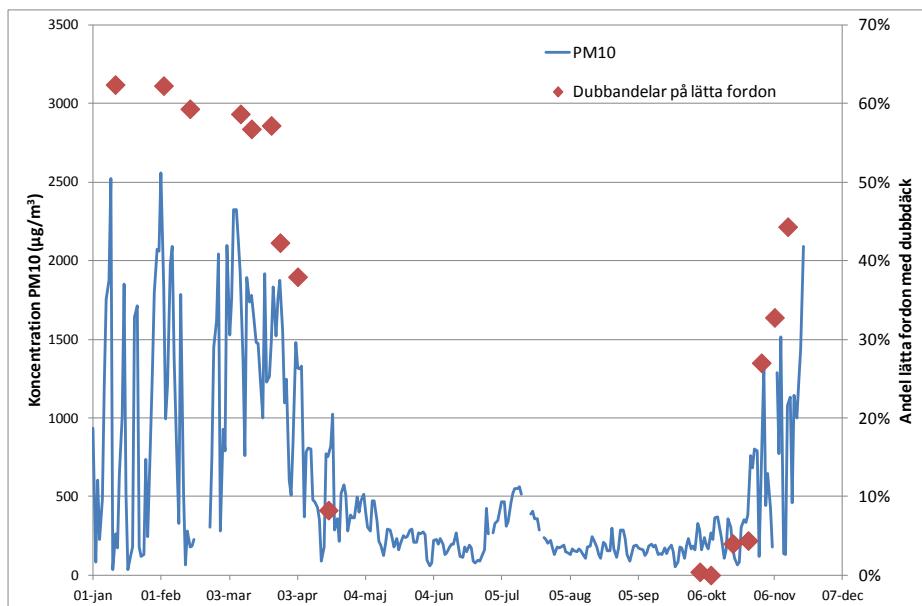
Figur 4. Dygnmedelhalter av NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub> samt CO vid mätstationen i Årstatunneln.

Halterna av PM10 i Södra länken tunneln varierar tydligt under säsongen beroende på användandet av dubbdäck i tunneln. I Figur 5 visas dygnmedelhalterna av PM10 tillsammans med andelen lätta

fordon med dubbdäck. Halterna av PM10 är en faktor 10 högre under vinterhalvåret jämfört med under sommaren. Halterna av PM10 i tunneln har alltså varierat kraftigt under den period som mätningarna i fordon genomförs (se även

Tabell 4). T ex var halterna under den första körningen den 15 mars över 1500 µg/m<sup>3</sup> medan halterna den 9 maj var under 300 µg/m<sup>3</sup>.

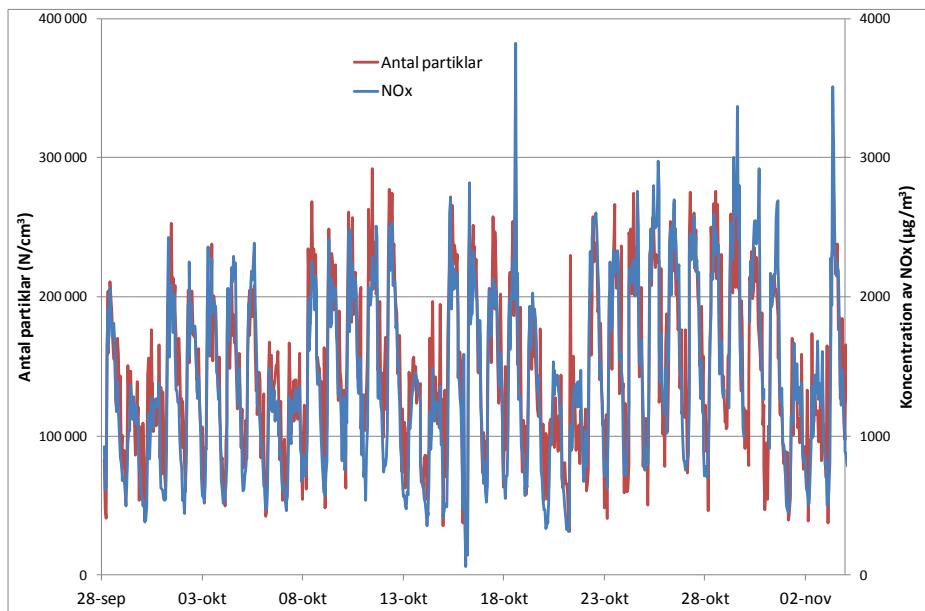
Variationerna inuti tunneln även under vinterdäcksäsongen beror på variationer i vägbanans fuktighet samt i luftens fuktighet. Då PM10 uppvisar en så pass avvikande säsongsvariation mot kväveoxiderna blir en linjär regression dålig ( $r^2 < 0,1$ ).



Figur 5. Dygnmedelhalter av PM10 vid mätstationen i Årstatunneln samt andelen lättfordon med dubbdäck. (Dubbdäckssandelen har räknats manuellt vid Ekerövägen och antas gälla för andra större vägar utanför innerstaden).

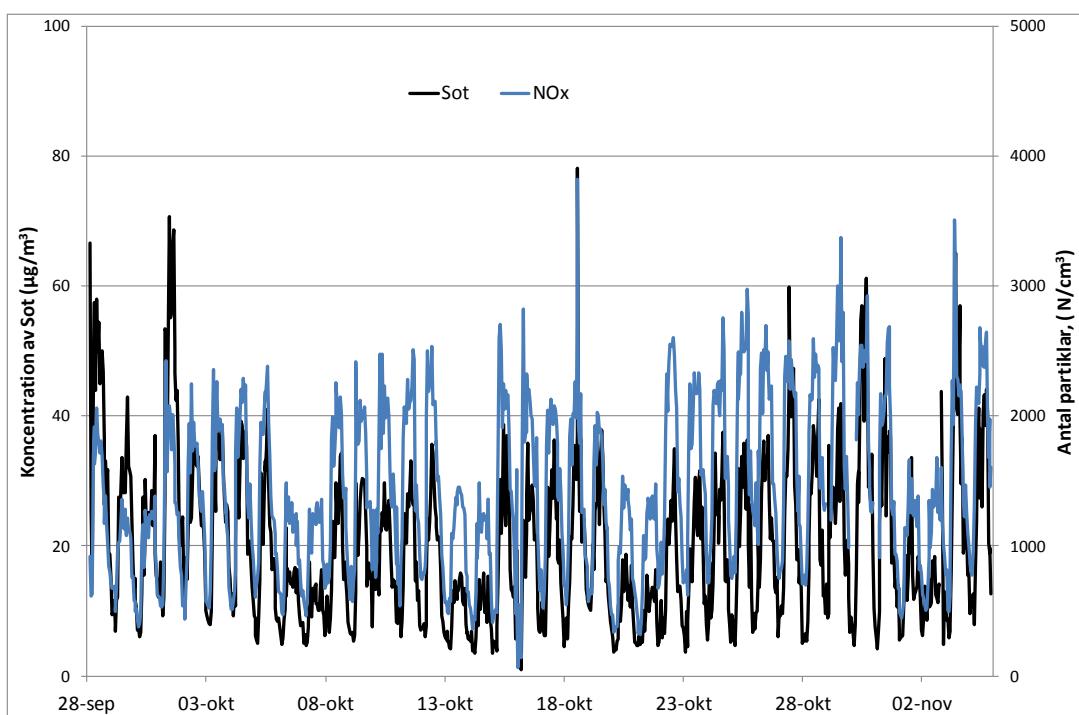
Under perioden 28 september till 4 november kompletterades de fasta mätningarna med mätningar av sot och antal partiklar vid mätstationen i Årsta tunneln. Timmedelvärdet presenteras tillsammans med halterna av NO<sub>x</sub> i Figur 6 och Figur 7. Medelhalten under perioden var 140 000 partiklar per cm<sup>-3</sup>. En mycket god samvariation mellan antalet partiklar och NO<sub>x</sub> ses. En linjär regression presenteras i Figur 8. Regressionen, se Tabell 5, visar på ett  $r^2$  på 0,80 och visar att NO<sub>x</sub> kan användas som indikator för antalet partiklar i tunnelmiljön. Förhållandet mellan NO<sub>x</sub> och partikelantal förväntas dock sakta ändras efterhand som fordonsparkens utsläpp ändras i framtiden.

## Halter av partiklar och NO<sub>x</sub> i fordon



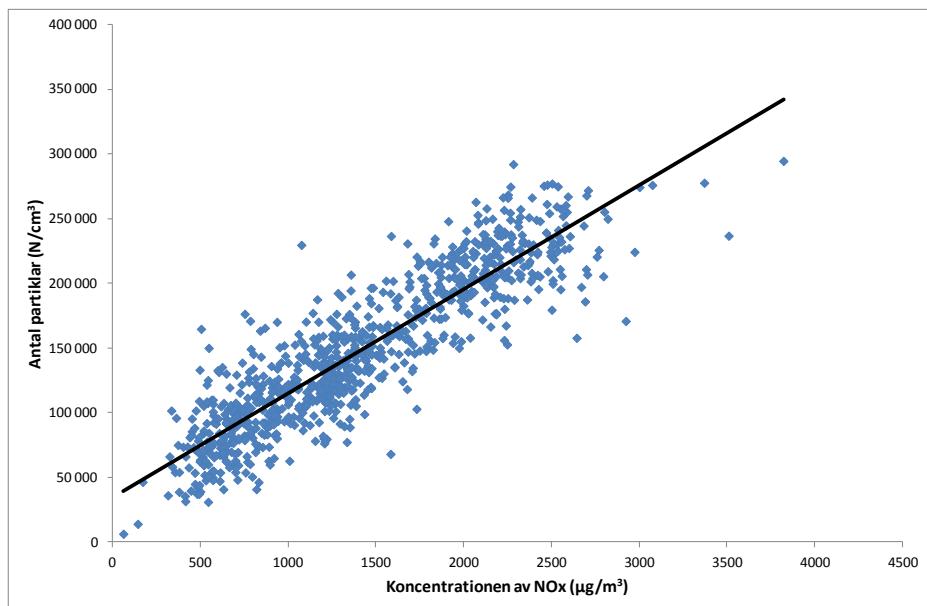
Figur 6. Timmedelhalter av NO<sub>x</sub> och antal partiklar vid mätstationen i Årstatunneln under perioden 28-september till 2-november.

Sot halterna, Figur 7, uppvisar inte lika bra samvariation med NO<sub>x</sub> som antal partiklar. Sot halterna mäts på ett filter vilket snabbt kan bli överbelastat i en förurenad miljö som tunneln. Innan närmare studier för hur eventuell korrigering ska göras för den höga belastningen på filtret används endast första veckans data, 28 september till 3 oktober. Den linjära regressionen i Figur 9 inkluderar endast data under första veckan och lutningen anger att sothalten kan erhållas som ca 3 % av NO<sub>x</sub>-halten med ett intercept på -6 µg/m<sup>3</sup> ( $r^2 = 0,85$ ).

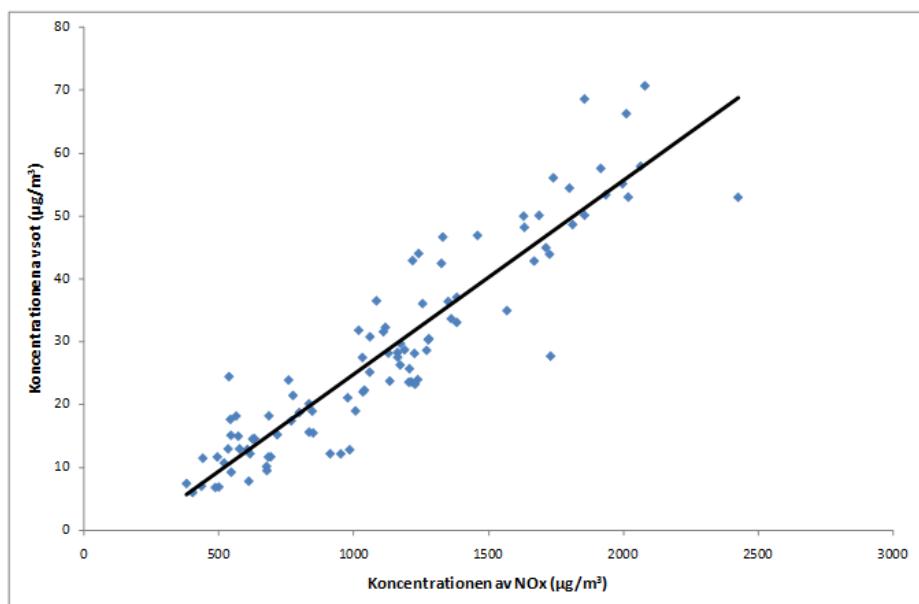


Figur 7. Timmedelhalter av NO<sub>x</sub> och sot vid mätstationen i Årstatunneln under perioden 28-september till 2-november. Sot halterna är preliminära.

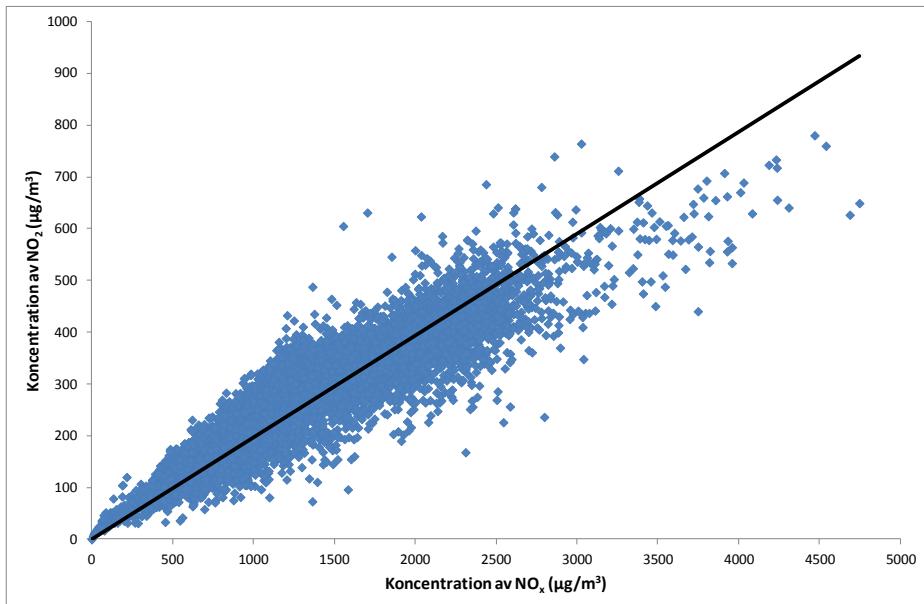
Halterna av NO<sub>x</sub> och NO<sub>2</sub> samvarierar också mycket väl i tunneln. Den linjära regressionen för timmedelvärdet under 2012 visas i Figur 10 och statistiken i Tabell 5. Det visar att ca 20 % av NO<sub>x</sub> halterna är NO<sub>2</sub>. Sambandet är stabilt och kan därför förmögligen användas för omräkning mellan NO<sub>x</sub> och NO<sub>2</sub> i tunnelmiljön. Andelen NO<sub>2</sub> av NO<sub>x</sub> har ökat i tunnlarna i Stockholm, från drygt 5 % i början av 2000-talet till ca 20 % idag (Burman, 2010). I framtiden förväntas andelen öka om andelen dieseldrivna fordon fortsätter öka.



Figur 8. Linjär korrelation mellan NO<sub>x</sub> och antal partiklar vid mätstationen i Årstatunneln perioden 28-september till 2-november.



Figur 9. Linjär korrelation mellan NO<sub>x</sub> och sot vid mätstationen i Årstatunneln perioden 28-september till 2-oktober.



Figur 10. Linjär korrelation mellan NO<sub>x</sub> och NO<sub>2</sub> vid mätstationen i Årstatunneln perioden 28-september till 2-november.

Tabell 5. Medelvärde samt linjär korrelation mellan NO<sub>x</sub> och andra föroreningar vid mätstationen i Årstatunneln

Ämne	Förhållande mot NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )				
	Lutning och intercept	r <sup>2</sup>	Medelvärde	Mätperiod 2012	
Antal partiklar >7nm (N/cm <sup>3</sup> )	80*[NO <sub>x</sub> ] + 34400	0,80	140 000	28-sep – 4-nov	
Sot (µg/m <sup>3</sup> )	0,030*[NO <sub>x</sub> ]-6,0	0,85	26,3	28-sep – 3-okt	
NO <sub>2</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	0,20*[NO <sub>x</sub> ] <sup>1)</sup>	0,77	276	1-jan – 19-nov	
NO <sub>x</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	-	-	1370	1-jan – 19-nov	

<sup>1)</sup>Regressionen med interceptet lika med noll.

### **Halter utanför bilen i samband med mätningar inuti fordon**

Tabell 6 visar intervallen för halterna av PM10, PM2,5, sot, partikelantal, NO<sub>2</sub> och NO<sub>x</sub> som observerades vid den fasta mätstationen i Årsta tunneln i samband med de mobila mätningarna, dvs. då mätningar i och utanför olika fordon genomfördes i tunneln.

Tabell 6. Koncentrationsintervall observerade i Södra länken tunneln (nära Årsta mynningen) i samband med att de mobila mätningarna genomfördes. Halterna avser medelkoncentration per passage.

Komponent	Koncentrationsintervall vid tunnelpassager
PM10, µg/m <sup>3</sup>	350-1600
PM2,5, µg/m <sup>3</sup>	60-170
Sot, µg/m <sup>3</sup>	15-30
Partikelantal, N/cm <sup>3</sup>	140000-180000
NO <sub>x</sub> , µg/m <sup>3</sup>	900-3300
NO <sub>2</sub> , µg/m <sup>3</sup>	280-530

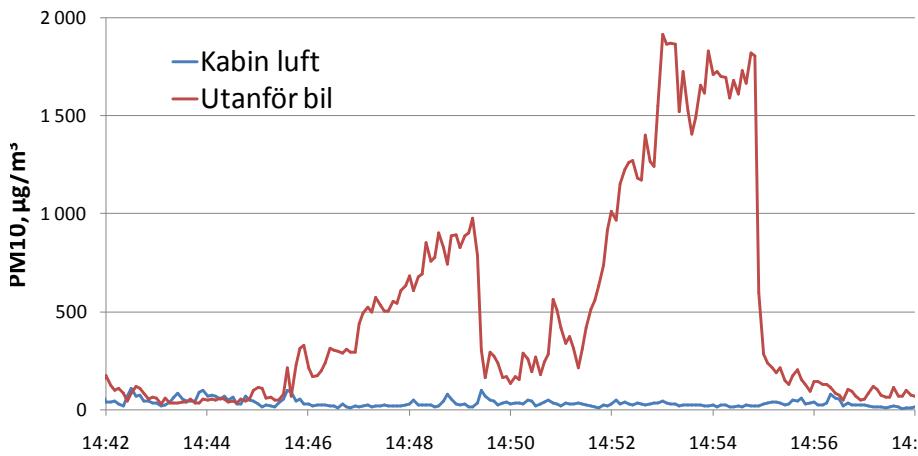
### **Förhållanden mellan omgivningshalter och kupéhalter**

Förhållandena mellan partikelhalten inuti bilkupén och utanför för olika ventilation och föroreningar framgår av Figur 13 - Figur 23. För samtliga fall har linjära regressionssamband och korrelationer mellan halterna utanför och inne i fordonen beräknats och detta presenteras nedan för varje fordon, ämne för ämne.

#### **PM10**

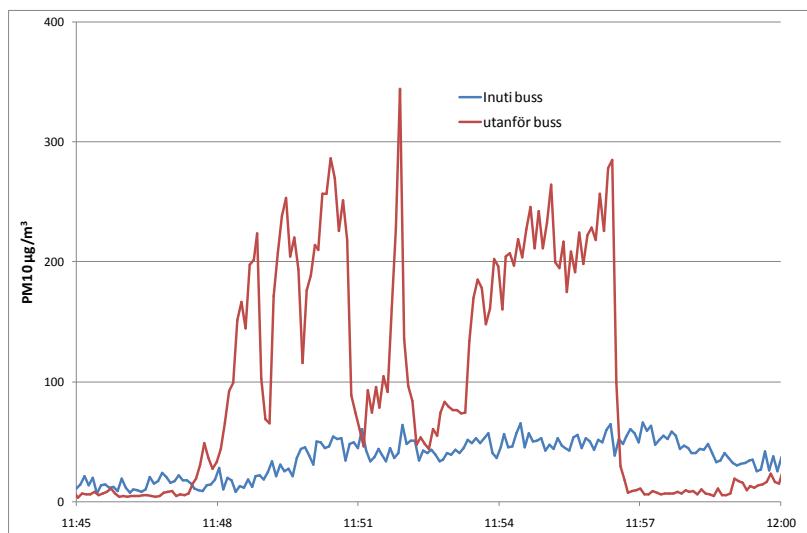
För massan partiklar som är mindre än 10 µm i diameter, dvs. PM10, är halterna i kupén betydligt lägre än utanför vilket tyder på att filtren har bra avskiljningsförmåga i samtliga av de testade bilmodellerna då ventilationen är påslagen.

Exempel på hur halterna varierade inuti och utanför Volvon med ventilationen påslagen presenteras i Figur 11. PM10-halten utanför bilen visar sig stiga under hela passagen genom tunneln och sjunker mycket hastigt när bilen färdas ut ur tunneln. Halterna varierar inte så snabbt inuti bilen vilket visar att de till stor del är oberoende av avstånd till eller typ av fordon framför. Halterna av PM10 inuti bilen är generellt låga. Utifrån Figur 11 går det inte att avgöra om halterna utanför bilen påverkar halterna i bilen.



Figur 11. Exempel på tidsvariation av PM10-halterna inuti och utanför Volvon den 15 mars. Färden går genom Södra länken tunneln österut 14:46 till 14:50 sedan vänder i cirkulationsplats utanför tunneln och färd genom tunneln västerut 14:51 till 14:55.

Exempel på variationerna av PM10-halterna inuti och utanför SL-bussen vid en färd genom Södra länken tunneln visas i Figur 12. Luftvolymen i bussen är betydligt större än volymen inuti personbilarna. Halterna inuti bussen påverkas då mycket långsammare av utomhushalterna än i personbilarna. En annan orsak till att halterna reagerar långsamt är också att mätningarna i bussen gjordes mitt i bussen, vilket är betydligt längre från ventilationsintagen jämfört med personbilarna. För PM10 i Figur 12 syns att halterna ökar när bussen kommer in i tunneln, men relativt långsamt. Halterna inuti bussen sjunker av samma orsak endast långsamt efter passage ut ur tunneln.



Figur 12. Exempel på tidsvariation av PM10-halterna inuti och utanför SL bussen den 3 december.

Spridningsdiagram av genomsnittliga kupéhalter mot halter utanför fordonen visar att halterna är överlag väl korrelerade då ventilationen är påslagen (Figur 13). Med ventilationen påslagen är förklaringsgraderna ( $r^2$  värdena) högst för Saaben (0,91), och lägst för Volvon (0,51) och SL-bussen Tabell 7. Volvon, har dock bäst

avskiljningsförmåga i luftfiltret och därmed lägst kupéhalt i förhållande till halten utanför fordonet, vilket i sig kan orsaka sämre korrelationen. Då det gäller bussen har den en lång luftutbytestid i och med den stora volymen. Från 2 % upp till 10 % av halten PM10 i tunneln uppmäts in i bilkupén för de testade fordonen vid ventilationen påslagen.

Tabell 7. Linjära regressionssamband mellan omgivningshalter av PM10 utanför fordon (T) och halter inne i fordonskupéer (K). Värdet inom parantes anger  $r^2$ -värdet för den linjära regressionen.

Ventilation/re-cirkulation	Volvo V70	Saab 95	Ford Focus	VW LT TDI	SL-buss
Ventilation	$K = 0.016T + 8.84$ (0.51)	$K = 0.041T + 4.76$ (0.91)	$K = 0.06T + 15.3$ (0.75)	$+ 10.2$ (0.67)	$+ 32.6$ (0.50)
Re-cirkulation	$K = 0.007T + 5.72$ (0.22)	$K = 0.0026T + 3.29$ (0.29)	$K = 0.0046T + 5.76$ (0.27)	-	-

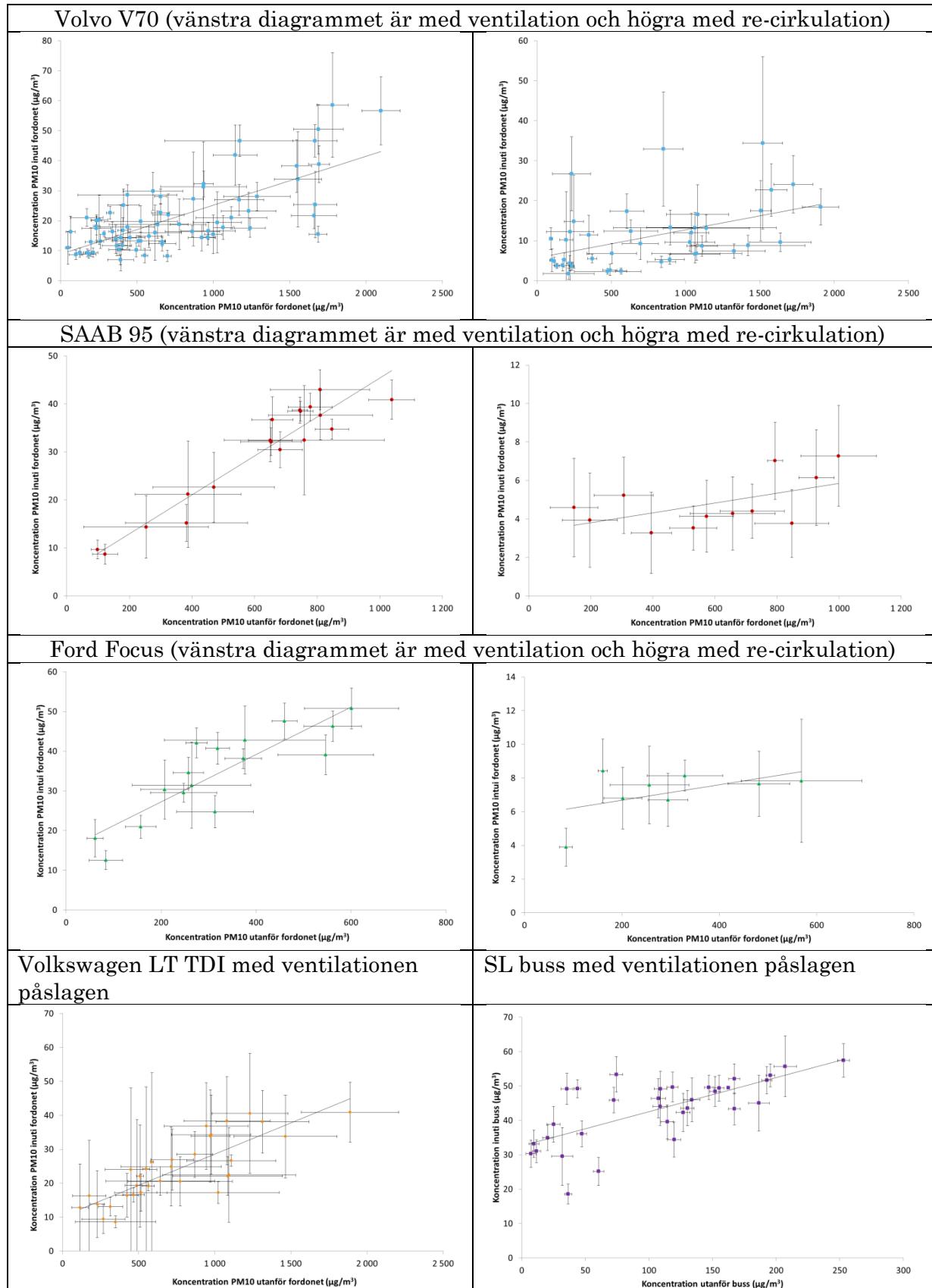
K = Kupékoncentration angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

T = Tunnelkoncentration utanför fordonet angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Tre av de fyra använda bilarna har dessutom möjlighet att re-cirkulera luften i bilen istället för att ventilera. För PM10 var korrelationen mellan kabin- och tunnelhalt låg för samtliga fordon i studien vid re-cirkulation, vilket kan förväntas eftersom intaget av tunnelluft främst sker via läckage genom dörrspringor m.m. Det kan också finnas interna källor till partiklar som exempelvis damm i klädsel.

Sammantaget är kupéhalterna betydligt lägre vid re-cirkulation än vid ventilation för alla testade bilmodeller. Halterna i kupén är mer eller mindre oberoende av halterna utanför fordonen vid re-cirkulation ( $r^2$  mellan 0,22 och 0,29 för personbilarna).

## Halter av partiklar och NO<sub>x</sub> i fordon



Figur 13. Spridningsdiagram av PM10-halterna inuti fordonen (y) mot halterna utanför fordonen (x). Linjerna representerar standardavvikelsen för medelhalterna i varje mätpunkt.

## PM2,5

För partiklar mindre än 2,5 µm i diameter, PM2,5, är kupéhalterna högre relativt halterna utanför fordonen, jämfört med förhållandena för PM10 då ventilationen är påslagen, vilket framgår av regressionskoefficienterna i Tabell 8 (se även Figur 14). Detta avspeglar sannolikt förhållandet att luftfiltren är bättre anpassade för att filtrera bort grova partiklar med en diameter mellan 2,5 µm-10 µm än partiklar mindre än 2,5 µm.

Tabell 8. Linjära regressionssamband mellan omgivningshalter utanför fordon (T) och halter inne i fordonskupéer (K) för PM2,5. Värdet inom parantes anger  $r^2$ -värdet för den linjära regressionen.

Ventilation/re-cirkulation	Volvo V70	Saab 95	Ford Focus	VW LT TDI	SL-buss
Ventilation	K = 0.07T + 3.69 (0.39)	K = 0.14T - 0.06 (0.96)	K = 0.22T + 3.33 (0.93)	K = 0.054T + 2.28 (0.75)	K = 0.12T + 12.2 (0.29)
Re-cirkulation	K = 0.0007T + 1.82 (0.002)	K = 0.0034T + 1.21 (0.31)	K = 0.0046T + 2.13 (0.08)	-	-

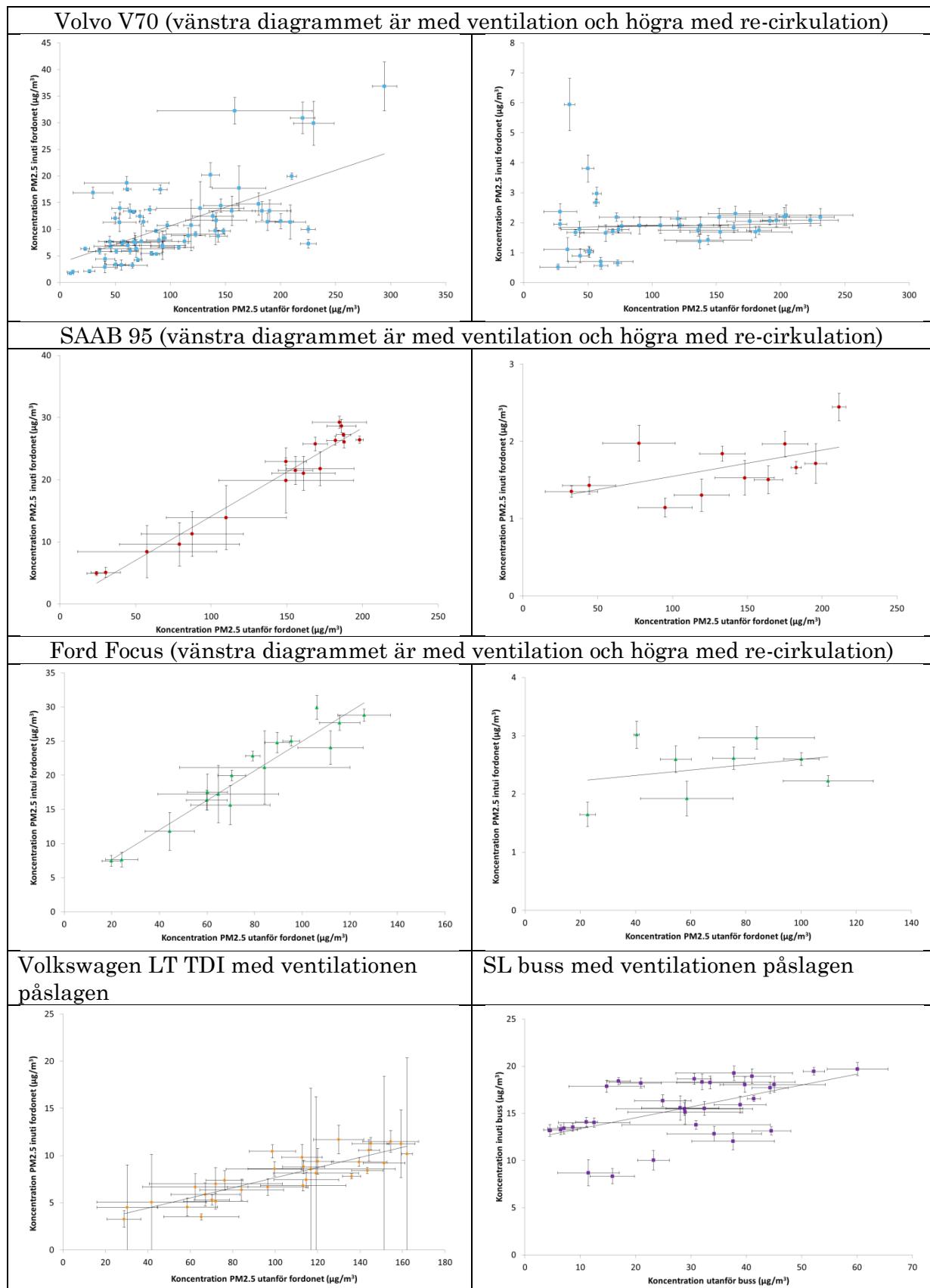
K = Kupékoncentration angett som µg/m<sup>3</sup>

T = Tunnelkoncentration utanför fordonet angett som µg/m<sup>3</sup>

För PM2,5 uppmäts lägst halter i Volkswagen vanen samt Volvon i relation till halterna utanför fordonen. Halterna i kupéerna är mellan 5 % och 22 % av halterna utanför bilcupén för de testade fordonen då ventilationen är påslagen. Förklaringsgraden  $r^2$  är högre än motvarande för PM10 för alla testade fordon utom Volvon och SL-bussen. Ett högt  $r^2$  kan förväntas vid en lägre filtreringseffektivitet.

Precis som för PM10 kommer en mindre andel partiklar in i kupén då re-cirkulationen är påslagen och korrelationen mellan halterna i kupéerna och utanför är låg, vilket framgår av Tabell 8. Vanen och bussen kördes inte med re-cirkulation.

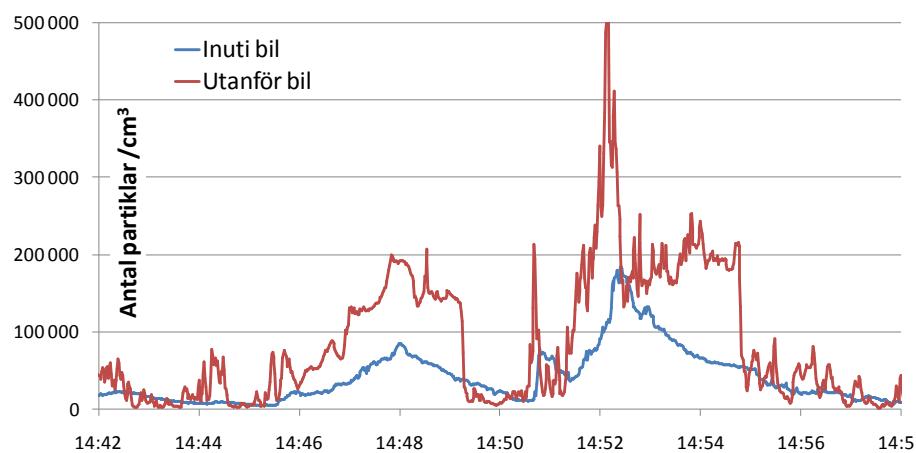
## Halter av partiklar och NO<sub>x</sub> i fordon



Figur 14. Spridningsdiagram av PM2.5-halterna inuti fordonen (y) mot halterna utanför fordonen (x). Linjerna representerar standardavvikelsen för medelhalterna i varje mätpunkt.

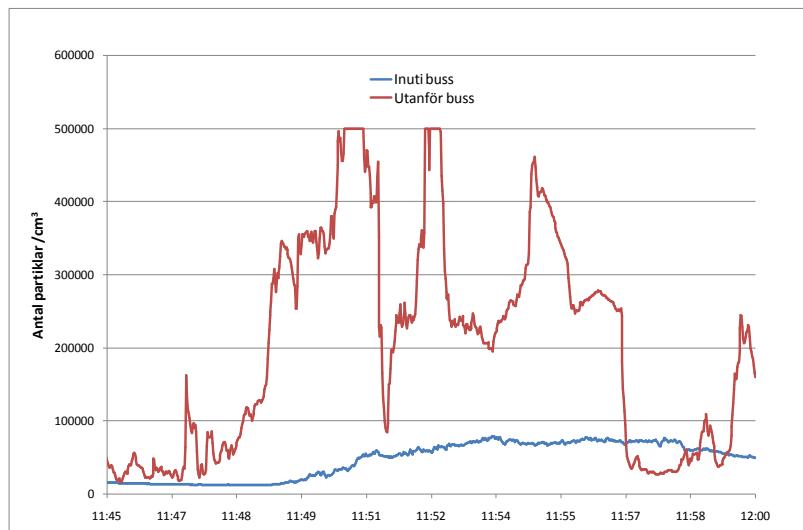
### Partikelantal (>20 nm)

Exempel på tidsvariationen för antal partiklar inuti och utanför Volvon vid färd genom Södra länken tunneln visas i Figur 15. Halterna varierar mer än för PM10, delvis beroende på att mätningarna gjordes med en högre tidupplösning (1 sekund). Antal partiklar utanför påverkas också tydligt av avstånd och typ av framförvarande fordon. T ex hamnade Volvon precis bakom en tung lastbil runt 14:52 vilket fick halterna utanför bilen att stiga kraftigt. Halterna inuti bilen stiger tydligt vid färd genom tunneln, men är inte alls lika varierande som halterna utanför bilen. Noterbart är även att halterna inuti bilen sjunker långsammare och faktiskt är högre än utomhushalterna under de närmsta minuterna efter att fordonen lämnat tunneln.



Figur 15. Exempel på tidsvariation av antal partiklar inuti och utanför Volvon den 15 mars. Se vidare information under Figur 11.

Även för antal partiklar inuti bussen förändras halterna långsamt i jämförelse med utomhushalterna, Figur 16. Det dröjer flera minuter innan halterna börjar öka inuti bussen vid infarten runt 11:48.



Figur 16. Exempel på tidsvariation av antal partiklar inuti och utanför SL bussen den 3 december. P-Trak för mätning av antal partiklar kan maximalt registrera 500 000 partiklar per cm<sup>3</sup>.

Antalet partiklar som finns inuti bilen respektive utanför bilen korrelerar mycket väl för alla studerade bilar vid ventilationen påslagen, men något sämre för SL-bussen (se diagram i Figur 17 och Tabell 9).

Tabell 9. Linjära regressionssamband mellan omgivningshalter utanför fordon (T) och halter inne i fordonskupéer (K) för partikelantal. Värdet inom parantes anger  $r^2$ -värdet för den linjära regressionen.

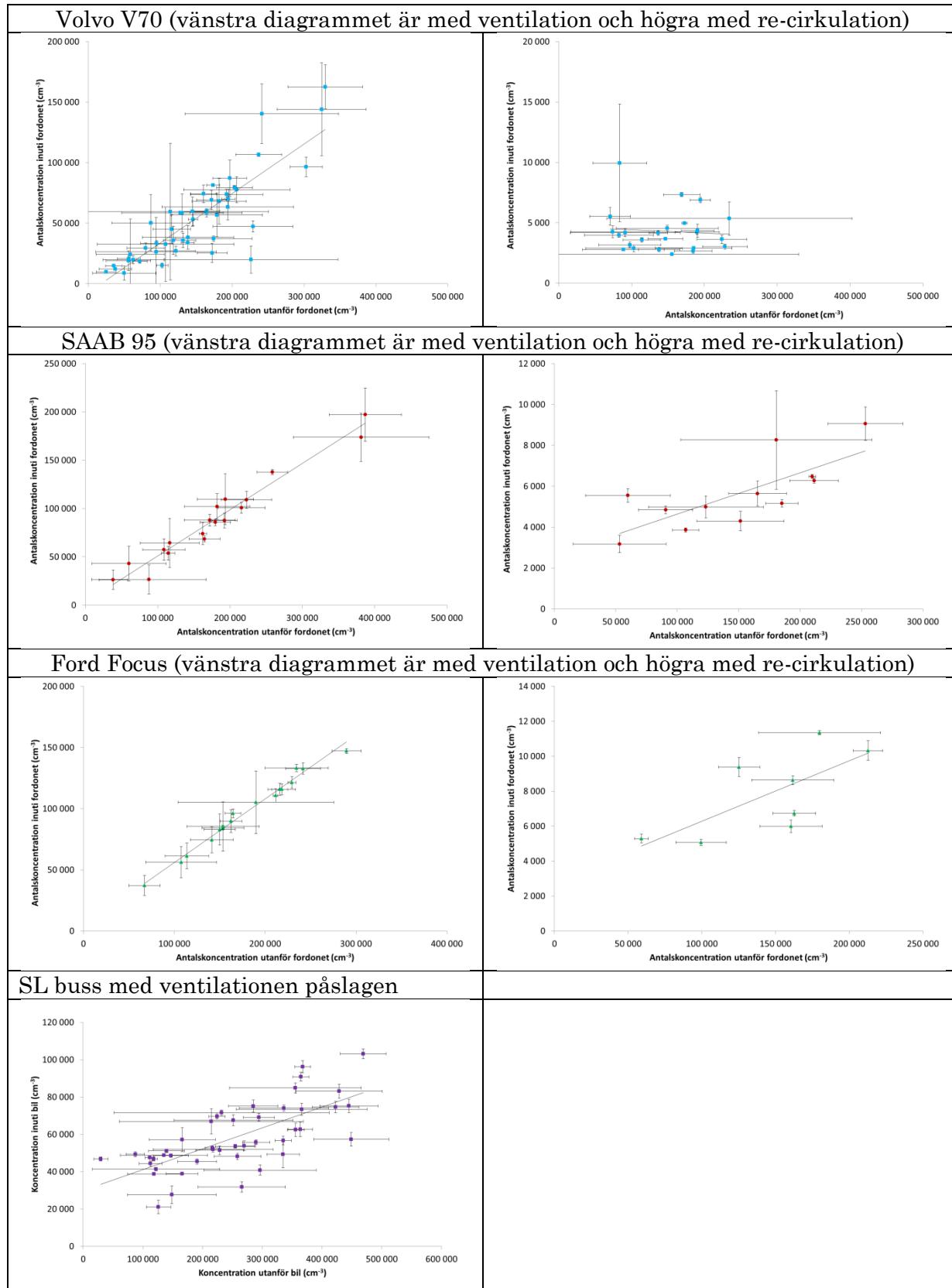
Ventilation/re-cirkulation	Volvo V70	Saab 95	Ford Focus	VW LT TDI	SL-buss
Ventilation	K = 0.41T - 7126 (0.72)	K = 0.48T + 3143 (0.96)	K = 0.52T + 3954 (0.98)	-	K = 0.11T + 29950 (0.50)
Re-cirkulation	K = -0.0027T + 4689 (0.006)	K = 0.02T + 2611 (0.56)	K = 0.035T + 2820 (0.49)	-	-

K = Kupékoncentration angett som cm<sup>-3</sup>

T = Tunnelkoncentration utanför fordonet angett som cm<sup>-3</sup>

Antalskoncentrationen av partiklar i fordonen är 41 % - 52 % av antalet utanför. Liksom för PM10 har Volvon bäst filtreringsförmåga och Forden sämst. Vid re-cirkulation fås däremot en luft med avsevärt lägre halter av antal partiklar inuti bilarna (Figur 17).

I bussen uppmättes halter som var 11 % av halterna i luften utanför. Värt att notera är det höga interceptet för bussen, som kan tolkas som ett stort bidrag till antalet partiklar från interna källor.



Figur 17. Spridningsdiagram med halterna av antalet partiklar inuti fordonen (y) mot halterna utanför fordonen (x). Linjerna representerar standardavvikelsen för medelhalterna i varje mätpunkt.

### Sot

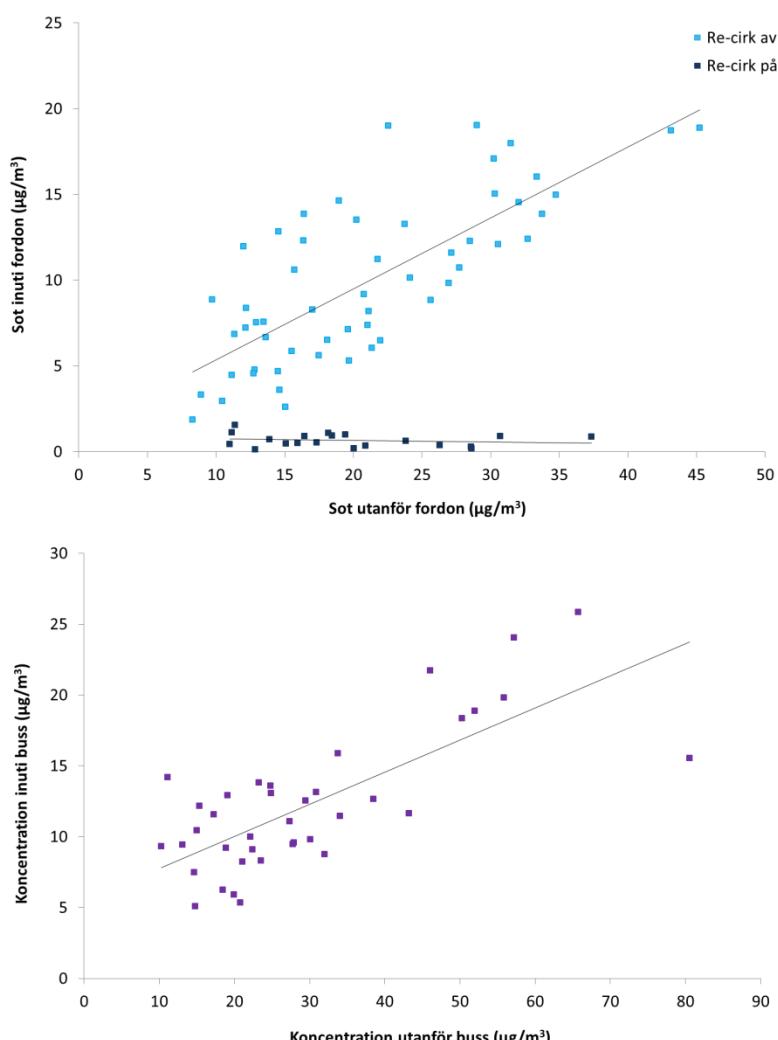
Sothalter har bara uppmäts med Volvon och SL-bussen. Resultatet visar att sothalten är 41 % av halten utanför Volvon vid ventilationen påslagen. Sothalten i kupén är mycket låg vid re-cirkulation. Även för sot var korrelation mellan kupé- och tunnelhalter dålig (Tabell 10). Inuti bussen var halten sot 23 % av motsvarande utanför bussen, i tunneln. Interceptet är högt, vilket kan innebära betydande bidrag från interna källor, vilket liknar korrelationen för partikelantal.

Tabell 10. Linjära regressionssamband mellan omgivningshalter utanför fordon (T) och halter inne i fordonen (K) för sot. Värdet inom parantes anger  $r^2$ -värdet för den linjära regressionen.

Ventilation/re-cirkulation	Volvo V70	SL-buss
Ventilation	$K = 0.41T + 1.24$ (0.58)	$K = 0.23T + 5.5$ (0.56)
Re-cirkulation	$K = -0.009T + 0.84$ (0.006)	-

K = Kupékoncentration angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

T = Tunnelkoncentration utanför fordonet angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

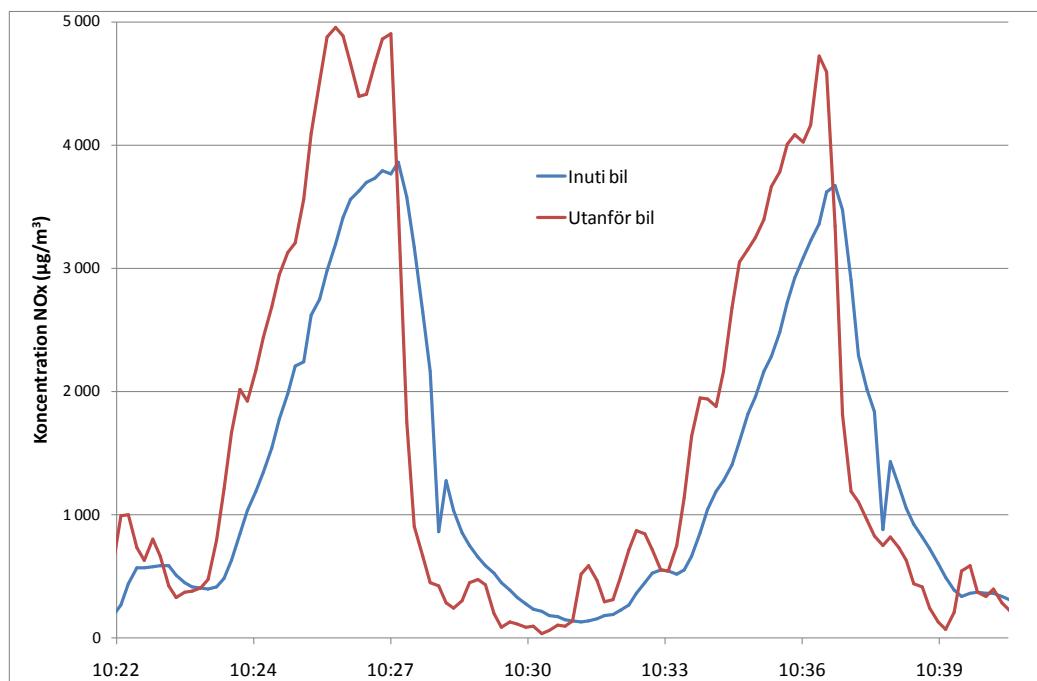


Figur 18. Spridningsdiagram med halterna av sot inuti Volvon (överst) och bussen (y) mot halterna utanför (x).

### Kväveoxider, NO<sub>x</sub> (NO+NO<sub>2</sub>)

Kväveoxider har uppmätts i och utanför Volvon med ventilationen påslagen. På grund av tekniska problem lyckades inte mätningar göras samtidigt inuti och utanför SL-bussen. Endast ett instrument inuti bussen var drift.

Exempel på tidvariationen av NO<sub>x</sub> inuti och utanför Volvon visas i Figur 19. Halterna både utanför och inuti bilen stiger kraftigt under färden genom tunneln och sjunker sedan hastigt när fordonet lämnar tunneln. Till skillnad från partikelhalterna är NO<sub>x</sub> halterna nästan i samma nivå inuti bilen som utanför.



Figur 19. Exempel på tidsvariation av NO<sub>x</sub> halterna inuti och utanför Volvon den 13 december. Färden går genom tunneln österut 10:23 till 10:28 sedan vänder i cirkulationsplats utanför tunneln och färd genom tunneln västerut 10:33 till 10:38.

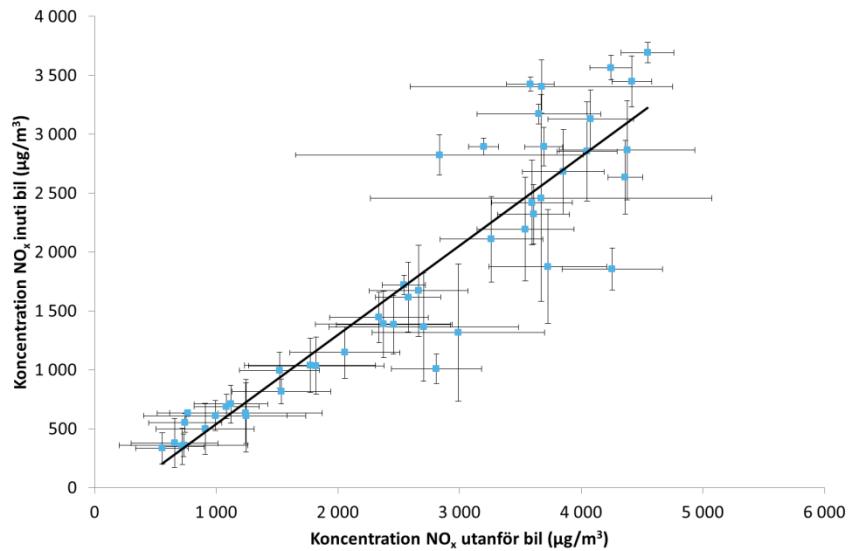
Spridningsdiagram med halterna av NO<sub>x</sub> inuti Volvon mot halterna utanför visas i Figur 20. Korrelationen är hög ( $r^2 0,84$ ) och i genomsnitt är kupéhalten 77 % av halten utanför bilen (Tabell 11).

Tabell 11. Linjära regressionssamband mellan omgivningshalter utanför fordon (T) och halter inne i fordonskupéer (K) för NO<sub>x</sub>. Värdet inom parantes anger  $r^2$ -värdet för den linjära regressionen.

Ventilation/re-cirkulation	Volvo V70
Ventilation	$K=0.756T - 217$ (0.84)

K = Kupékoncentration angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  alternativt  $\text{cm}^{-3}$  (antal)

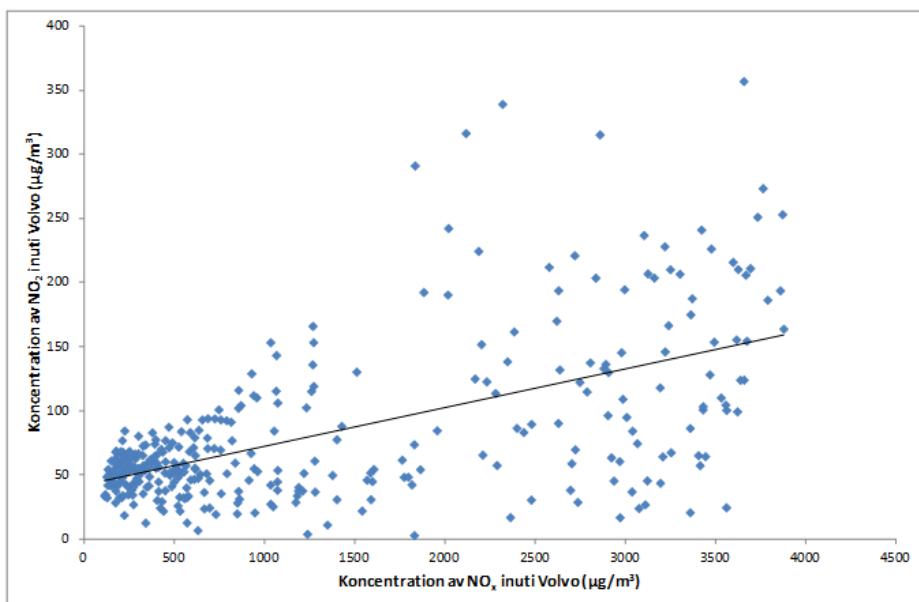
T = Tunnelkoncentration utanför fordonet angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  alternativt  $\text{cm}^{-3}$  (antal)



Figur 20. Spridningsdiagram av halterna av kväveoxider inuti Volvon (y) mot halterna utanför (x).

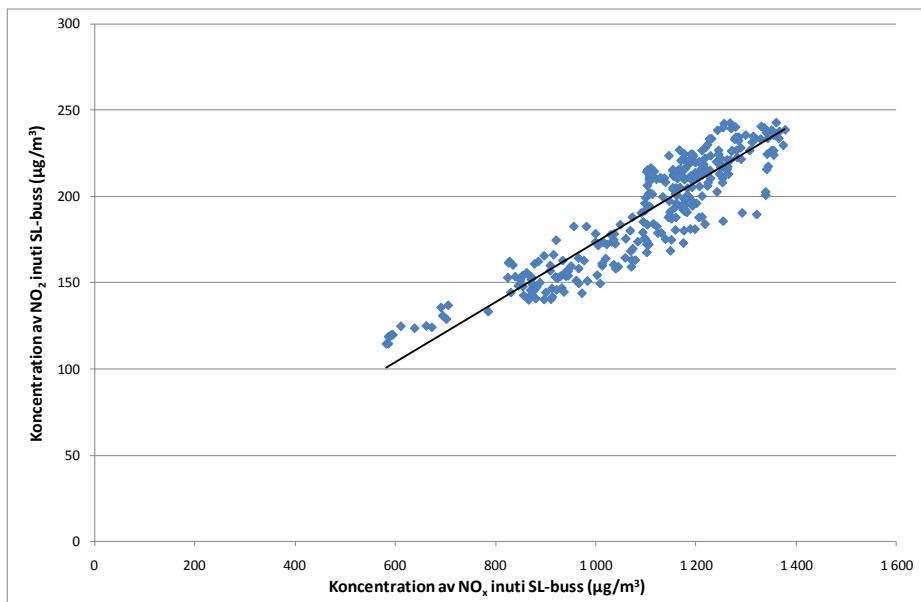
#### Kvävedioxid, NO<sub>2</sub>

Figur 21 visar att NO<sub>2</sub> halten inuti Volvon inte är speciellt väl korrelerad med NO<sub>x</sub>. Andelen NO<sub>2</sub> av NO<sub>x</sub> är i genomsnitt ca 5 %. Detta skiljer sig från ca 20 % NO<sub>2</sub> av NO<sub>x</sub> som finns i tunnelluft (Tabell 5). Förklaringen kan vara att luftfiltret i Volvon kan absorbera gasformiga luftföroreningar (se förklaring tidigare i rapporten). Kupéluften i bilen övervakas dessutom av ett luftkvalitetssystem som mäter vissa gasformiga luftföroreningar i den inkommande luften. Enligt specifikationen stängs luftintaget till kupén helt automatiskt ”långt innan halterna blir för höga och utan att föraren behöver trycka på någon knapp”. Det ska dock noteras att dessa data är osäkra pga. möjlig kontaminering av NO ifrån pumpen till NO<sub>x</sub>-instrumentet. Ytterligare mätningar krävs innan några säkra slutsatser kan dras.



Figur 21. NO<sub>2</sub> halten (y) i relation till NO<sub>x</sub> halten (x) i Volvon och i bussen.

Ett spridningsdiagram med halterna av NO<sub>x</sub> och NO<sub>2</sub> i SL bussen visas i Figur 22. Andelen NO<sub>2</sub> av NO<sub>x</sub> är i genomsnitt ca 17 %. Sambandet mellan NO<sub>2</sub> och NO<sub>x</sub> inuti bussen är väldigt nära det som uppmätts i tunnel luften, ca 20 % NO<sub>2</sub> (Figur 10 och Tabell 5). Det visar att till skillnad från inuti Volvon så passerar NO<sub>2</sub> tämligen opåverkat igenom ventilationen in i bussen. Även i detta fall kan kontaminering av NO ifrån pumpen till NO<sub>x</sub>-instrumentet ha skett.



Figur 22. Spridningsdiagram med halterna av kväveoxider inuti bussen (x) mot halterna av kvävedioxid inuti bussen (y) (medelvärden under 10 sekunder).

Tabell 12. Linjära regressionssamband mellan NO<sub>2</sub> halter inuti fordonskupéer (T) och NOx halter inne i fordonskupéer (K). Värdet inom parantes anger r<sup>2</sup>-värdet för den linjära regressionen. Sambandet är tvingat genom noll.

	<b>Volvo V70</b>	<b>SL-buss</b>
Ventilation	K=0,047T (0,13)	K=0,17T (0,82)

K = Kupékoncentration av NO<sub>2</sub> angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

T = Kupékoncentration av NOx angett som  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

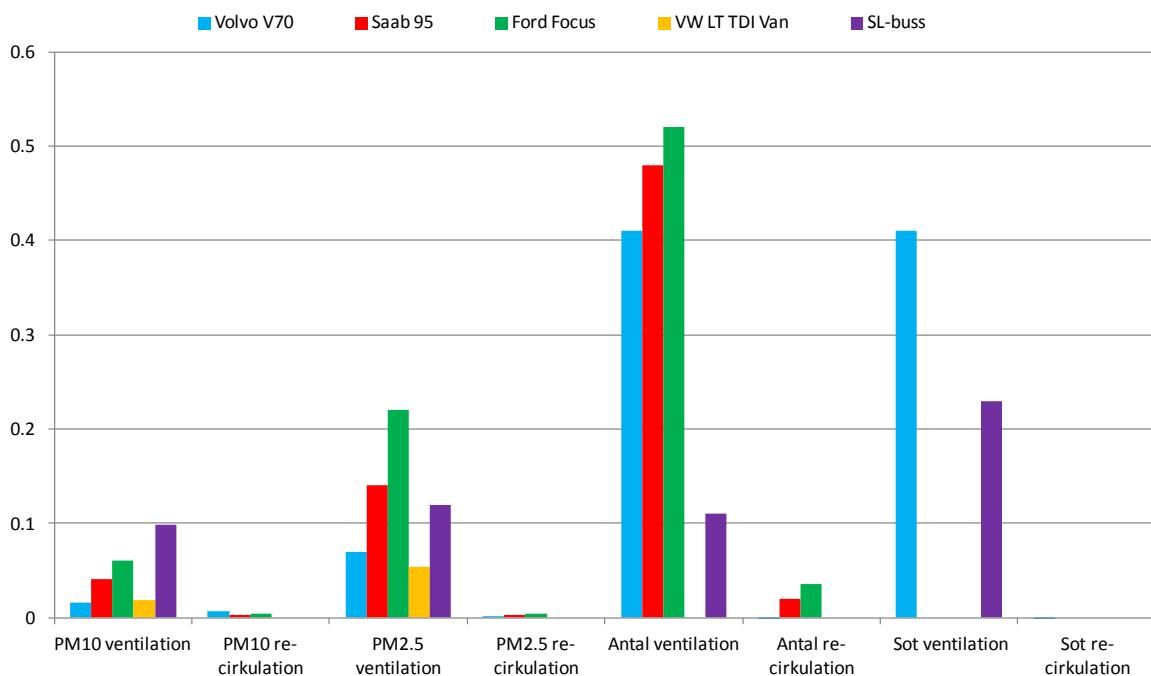
#### Jämförelse av halter i kupéer för olika partikelmått

Figur 23 visar en sammanställning av halterna i fordonskupéerna i relation till halterna utanför. Om man ser till **personbilarna** då ventilationen är påslagen är halterna av PM10, PM2,5 och antal partiklar i relation till utanför lägst för Volvon följt av Saaben och därefter Forden. Antal partiklar och sot verkar ha högst penetration in i fordonen. För sot finns dock bara mätningar för Volvon, men man kan förmoda att sothalterna är något högre även i de andra personbilarna på motsvarande sätt som för antalet

partiklar. Det innebär att sothalterna i de äldre fordonen kan uppskattas vara ca 50 % av halterna utanför (baserat på relationen mellan antalet partiklar i Volvon jämfört med antalet partiklar i Saaben och Forden). Med re-cirkulation är halterna i fordonskupéerna mycket låga för samtliga partikelmått och fordonstyper.

Även för **SL bussen** erhölls högst halt i förhållande till utanför bussen för sot; drygt 20 % med ventilationen påslagen. Den stora volymen i bussen gör att det tar relativt lång tid att byta ut luften i bussen även om ventilationen är påslagen.

För **Volkswagen vanen** (2001 års modell) är halterna av PM10 och PM2,5 relativt låga i förhållande till utanförfordonen, t o m i nivå med den nya Volvon utrustad med specialfilter: Det är svårt veta hur representativ detta fordon är för dagens fordonsflotta av lätta lastbilar, men sannolikt kan variationerna i ventilations- och filtersystem vara mycket stora, så utifrån dessa mätningar går det inte att dra några generella slutsatser om halterna i fordonskupéer för lätta lastbilar.



Figur 23. Halten inuti fordon i relation till halten utanför fordon då de färdas genom tunnel, baserat på lutningen från de linjära regressionsanalyserna mellan halterna i fordonskupéerna och halterna utanför fordonen vid färd genom Södra länken tunneln.

### Sammanställning av resultat från andra studier

Skillnaderna i halterna inne i fordon mellan olika fordonstyper kan vara mycket stora och varierar dessutom beroende på ventilation, fordonshastighet och totala fordonsflödet i tunneln (Boulter et al., 2004; Sandman, 2007; SLB analys, 1994). Sammanställningen av en mängd mätningar av Boulter et al. (2004) tyder på att skillnaderna mellan

halterna av olika gasformiga ämnen i och utanför fordonen kan vara ganska små. Mätningarna av Sandman (2007) och av SLB analys (1994) antyder att halterna inne i fordon av NO<sub>x</sub> är lägre än i tunneln. SLB analys mätningar visade att halterna inne i fordonet ökar kraftigt om avståndet till framförvarande fordon minskar, speciellt om det framförvarande fordonet är en lastbil med höga utsläpp.

### **Partiklar**

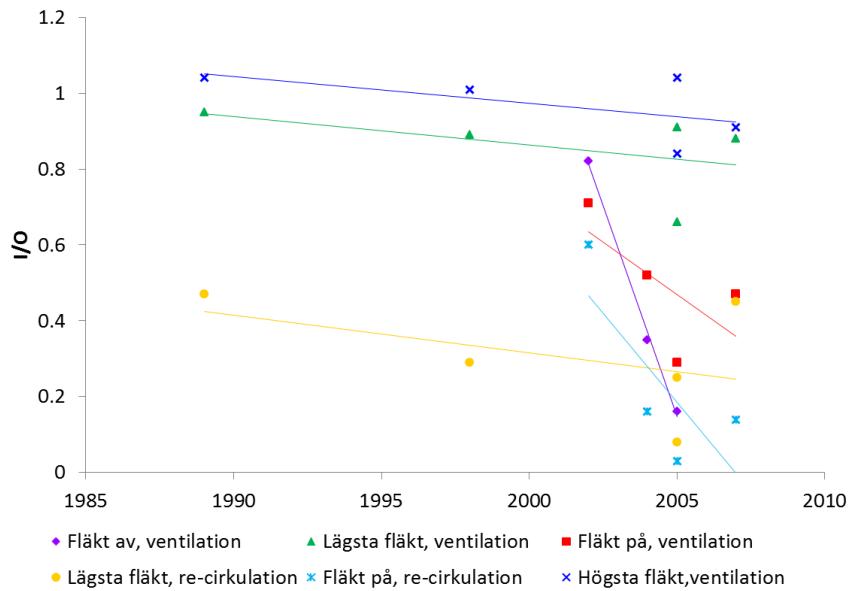
Ett flertal tidigare studier har jämfört partikelhalterna inuti fordon med de som fotgängare utsätts för eller med halterna vid en fast mätstation (Adams et al., 2001; Asmi et al., 2009; Briggs et al., 2008; Gee and Raper, 1999; Gulliver and Briggs 2004, 2007; Kaur et al., 2005, Riediker et al., 2003; Zagury et al., 2000). Detta gäller även tidigare studier sothalterna (Adams et al., 2002; Zielinski et al., 1997). Det är tyvärr svårt att utifrån dessa studier dra slutsatser om relationen mellan halterna i fordon och direkt utanför fordonen eftersom gångvägar och bilvägar inte följs åt. Exempelvis varierar koncentrationen av partiklar kraftigt med höjden och avståndet från vägen. Om provtagaren sitter 2,5 meter över vägen är halten PM2,5 ungefär 14 % lägre än halten på 0,7 meters höjd (Gulliver and Briggs, 2007). För sot och antal partiklar är variationerna betydligt större än för PM2,5.

Flera relevanta studier har däremot gjorts med avseende på ultrafina partiklar (< 100 nm i diameter). Dessa partiklar brukar utgöra 90 % eller mer av det totala partikelantalet i trafikmiljöer (Morawska et al., 2008). Man har observerat att volymen tunga dieselfordon per timme är den primära avgörande faktorn för koncentrationen av ultrafina partiklar utanför fordonen inne i en tunnel (Knibbs et al., 2009, 2010). Ventilationen är den viktigaste parametern för att avgöra antal ultrafina partiklar som når in i bilen.

Tunnelexperiment har gjorts i Sydney under 2006 och 2008 där luftflödet in till fordonet, luften inuti fordonet och luften inuti tunneln analyserades med avseende på halten av ultrafina partiklar (Knibbs et al., 2010). Fem olika personbilar; Subaru Outback 2007, Toyota Hilux 2005, Volkswagen Golf 2005, Mitsubishi Magna 1998, Mazda 1989; kördes genom en 4 km lång tunnel under fler än 300 tillfällen. Bilarna var utrustade både med och utan AC och pollenfilter och flera ventilationsinställningar användes. En motorvägsstudie har även utförts i Portland, USA under 2010 med tre olika personbilar; PT Cruiser 2005, Audi 4 1.8T 2004, Volkswagen Jetta 1.8T 2002 (Zhu et al., 2007). Bigazzi and Figliozi (2012) har även kört en Honda Civic Hybrid (2007) på motorvägar i Los Angeles, USA under år 2010 och mätt ultrafina partiklar.

Det finns betydande skillnader mellan kvoterna partiklar inuti/partiklar utanför bil (I/O) för olika fordon och olika ventilationsinställningar. Dessa varierar mellan 0,03 och 1,04 i de tre olika studierna, vilket illustreras i Figur 24. Hög fläkthastighet samt avstängd re-cirkulation gav högst kvoter medan påslagen re-cirkulation generellt gav lägre kvoter. Det är i linje med resultaten i denna rapport om man jämför med partikelantalet. Däremot är det en avsevärd spridning beroende på bilmodell, vilket inte observerats för de testade modellerna i denna studie. Nyare bilar tenderar att vara bättre än äldre men undantag finns. Exempelvis var Subarun nyast och ändå sämst av bilarna i studien av Knibbs et al. (2010) Anmärkningsvärt nog är den bilmodellen utrustad med ett HVAC

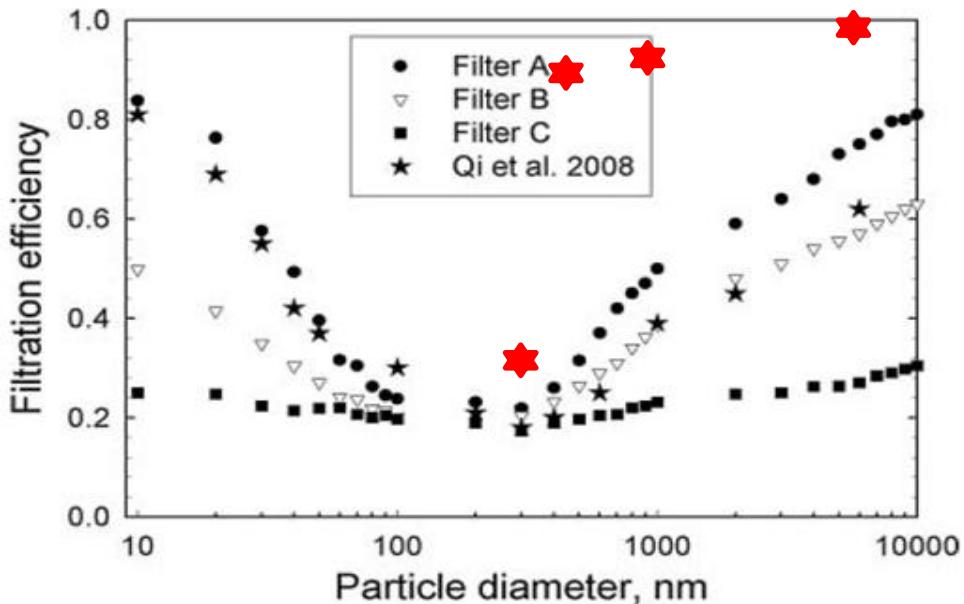
pollenfilter. Författaren av studien spekulerar huruvida filtret var defekt men orsaken är oklar.



Figur 24. I/O som funktion av biltillverkningsår för olika ventilationsinställningar. I/O är kvoten mellan koncentrationen av ultrafina partiklar inuti bilen och utanför bilen.

Utöver ventilationsinställningen är prestandan av reningsfilter i bilen en viktig faktor för de aktuella halter av luftföroreningar som passagerarna utsätts för. Tre olika partikelfilter som skulle representera de som finns på marknaden testades i en studie från 2011 (Xu et al., 2011). Alla var gjorda av vävt papper. Filtreringskapaciteten utvärderades för grova, fina respektive ultrafina partiklar (10 nm-10 µm) och resultatet kan ses i Figur 25. Den lägsta filtreringskapaciteten för alla filter var 20 % och för partiklar med en diameter av 200 nm. För de minsta samt de största partiklarna varierade filtreringskapaciteten mellan ca 25-80 % respektive 30-80 %. Generellt gäller att filtreringen av grova partiklar mellan 2,5 och 10 µm är effektiv, medan filtreringen av antalet partiklar och sotpartiklar är mer ineffektiv.

Skillnaden i kapacitet för ett nytt filter jämfört med ett 30 månader gammalt filter (under estimerad snittbelastning) är liten vid lätt trafik men betydande vid hög belastning. Den största förändringen vid tung trafikbelastning uppmätttes för de minsta partiklarna och var 85 % av den ursprungliga kapaciteten. För ultrafina partiklar har studier gjorts som visat att filtreringseffektiviteten var mellan 30 % och 60 % (Pui et al., 2008; Qi et al., 2008). Hudda et al. (2011) spekulerade däremot att avskiljningsgraden för partiklar mellan 14-400 nm inte beror så mycket på filtret utan på att deposition av partiklarna sker på övriga ytor i ventilationssystemet och på bilen. Tre bilar testades och endast mindre skillnader i avskiljningsgrad uppmätttes mellan bil med respektive utan filter. I snitt kom 66 % av partiklarna mellan 10-1000 nm in i fordonen.



Figur 25. Filtreringseffektivitet som funktion av partikeldiameter för tre filter testade av Xu et al. (2011) samt ett av Qi et al. (2008). De röda fyllda stjärnorna visar den av Volvo angivna filtreringseffektiviteten för ett nytt filter i Volvo V70.

### Kväveoxider

Det finns betydligt färre studier av gasutbyte mellan bil och omgivning jämfört med partiklar. I en tidigare studie som genomfördes i Hong Kong drogs slutsatsen att korrelationen mellan NO och NO<sub>x</sub> utanför fordonen respektive NO och NO<sub>x</sub> inuti fordonet är liten, vilket kunde tyda på att penetrering in till fordonet hindras till viss del enligt författarna (Chan and Chung, 2003). Trots det var medelhalterna av NO och NO<sub>2</sub> högre inuti bilen jämfört med utanför bilen, i tunnel med re-cirkulationen påslagen. I ett arbete av Rim et al. (2008) som genomfördes i Texas med olika bussar, såg man att också halterna av NO och NO<sub>2</sub> generellt var högre inuti bussen. Bussarnas rutt inkluderade flera stopp med dörröppning. Det gör resultatet svårt av att jämföra med denna studie.

## Exponering i fordon vid färd i biltunnlar

Exponeringen för luftföroreningar vid färd genom vägtunnlar beror av en rad faktorer:

- Vistelsen inne i tunneln som påverkar dosen som personer utsätts för
- Fordonsventilationen, typen av filter mm som påverkar mängden föroreningar som tränger in i fordonskupén
- Volymen av fordonskupén (fordonsstorleken) påverkar omsättningstiden för luften i fordonskupén. Om omsättningstiden är lång kommer en mindre mängd föroreningar från tunnelluftens in i kupén under färd i tunneln, men samtidigt sker utvädringen av föroreningarna längsammare då fordonet passerat ut ur tunneln om ventilationen inte ändras efter passagen av tunneln.
- Antal fordon, typ av fordon, lutningen, fordonshastigheten och tunnelventilationen, som påverkar utsläppen och föroreningshalterna i tunnelluftens

- Vägbaneförhållanden, däckstyper och trafikförhållanden som påverkar mängden slitagepartiklar från vägbanan, dvs mängden grova partiklar i tunnelluftens.

Som framgått av resultaten från mätningarna ovan är mängden somtränger in i fordonskupéerna olika beroende på hur effektivt ämnena fastnar i kupéfilter mm. Halten i fordonskupén ( $C_k$ ) vid tiden  $t$ , kan beskrivas som en funktion av halten i tunnelluftens ( $C_t$ ), andelen som filtreras bort i ventilationssystemet (inklusive ventilationsfiltret,  $\psi$ ), ventilationsflödet ( $q$ , m<sup>3</sup>/s) och kupévolymen ( $V$ , m<sup>3</sup>):

$$C_k(t) = (1 - \psi) * C_t(t) - ((1 - \psi) * C_t(t) - C_k(t-1)) * \exp\left(-\frac{q}{Vt}\right) \quad (1)$$

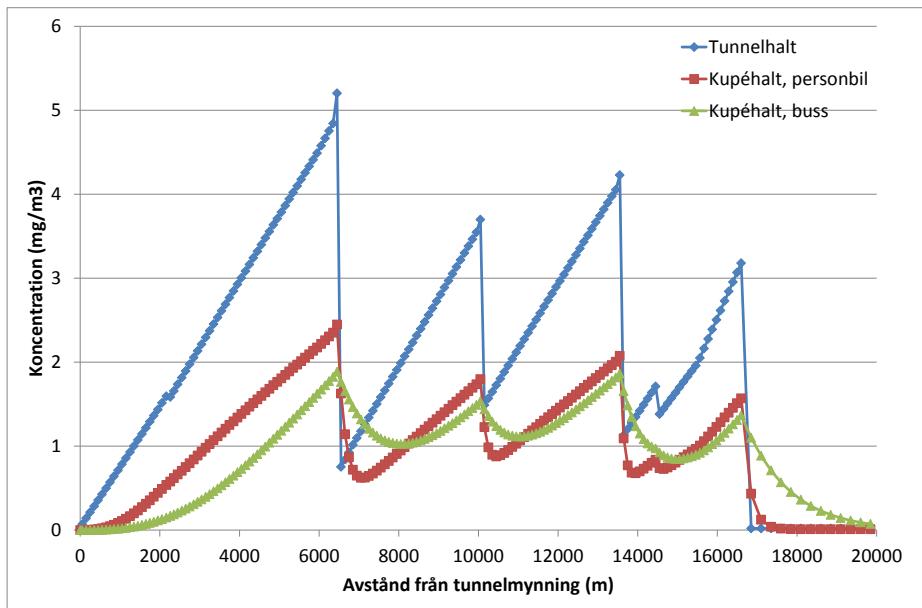
där  $V/q$  är omsättningstiden för luften i fordonskupén. Halten i tunnel vid tiden  $t$ , beror av emissionen,  $E$  (=emissionsfaktorn,  $E_f$ , g per fordonskilometer, gånger antal fordon per tidsenhet,  $Fo$ ), fordonshastigheten,  $v$ , och tunnelventilationsflödet,  $Q$ . För ett längsventilerat tunnelavsnitt utan luftutbyte och på- och avfarter kan halten i tunneln beräknas som:

$$C_t(t) = C(0) + E_f * Fo * \frac{v}{Q} * t \quad (2)$$

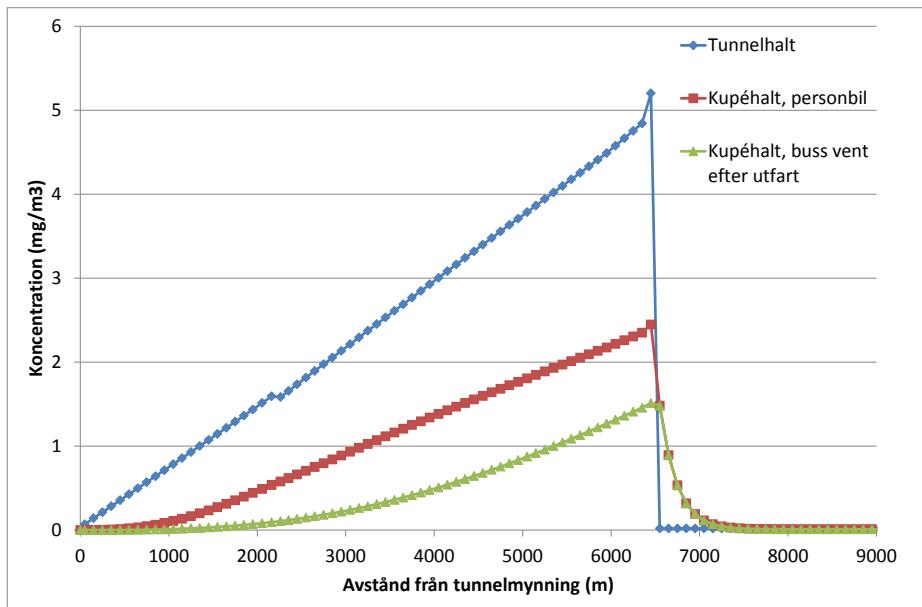
där  $C(0)$  är halten utanför tunneln vid infarten. Med kännedom om hur emissionsfaktorn beror av olika fordonstyper, andelen dubbdäck, typ av vägbeläggning och fordonshastighet kan därmed föroreningshalterna i (framtida) tunnlar beräknas. Förbifartens planerade tunnel har flera luftutbytesstationer och på- och avfarter som påverkar tunnelhalten.

Figur 26 visar ett exempel på hur tunnelhalten kan komma att variera i Förbifartens tunnel vid färd från Kungens kurva i söder till Hjulsta. I detta fall är det NO<sub>x</sub> halter, men skulle kunna vara PM10 eller sothalter (med annan skala på y-axeln). Tunnelhalten varierar beroende på att luften byts ut vid s.k. luftutbytesstationer och på grund av att utsläppen varierar beroende på trafikmängden i olika tunnelavsnitt. Halterna i fordonskupéerna har beräknats med ekvation (1) ovan med filtreringseffektiviteten lika med 0,50. För personbilen antogs att tiden för omsättning av luften ( $V/q$ ) är 11 minuter och för bussen 111 minuter. Halterna i fordonskupéerna ökar och sjunker långsammare än halterna i tunnelluftens eftersom det tar tid att byta ut luften i fordonskupéerna. När fordonen kommit ut ur tunneln tar det en tid innan halterna når omgivningshalterna (eller lägre). Hur snabbt halterna i fordonskupéerna anpassar sig till halterna i omgivningen är förstås beroende på inställningen av ventilationen.

Figur 27 visar ett exempel med samma förutsättningar vad gäller filtrering och omsättningstider, men utan luftutbytesstationer och där halten i bussen antas vädras ut lika snabbt som i personbilen så snart bussen kommit ut från tunneln. Detta kan illustrera förhållandet att bussen lämnar tunneln och stannar vid en hållplats där dörrarna öppnas för på- och avstigande.



Figur 26. Exempel på variationen i NO<sub>x</sub> halten i Förbifartens tunnel från Kungens kurva till Hjulsta samt beräknade halter i fordonskupén (ekv 1) i en personbil och en buss om man antar att 50 % av tunnelluftens NO<sub>x</sub> fastnar i fordonens ventilationssystem. Tunnen är 17 km lång och har flera luftutbytesstationer längs sträckan. Fordonen antas ha olika luftomsättning; 4 min för personbilen och 40 min för bussen.



Figur 27. Exempel på variationen i NO<sub>x</sub> halten i en tunnel utan luftutbyte. De beräknade halterna i fordonskupén i en personbil och en buss antas att 50 % av tunnelluftens föroreningshalt fastnar i fordonens ventilationssystem (ekv 1). Fordonen antas ha olika luftomsättning; 4 min för personbilen och 40 min för bussen.

Tabell 13 visar medelhalterna i fordonskupéerna för de båda exemplen i Figur 26 och Figur 27. I fallet med luftutbytesstationer (exempel från Förbifartstunneln) blir den genomsnittliga halten 1,05 respektive 0,89 mg/m<sup>3</sup> i personbilen respektive bussen. Dessa värden skall jämföras med 2,19 mg/m<sup>3</sup> som är medelhalten utanför fordonen, som mestadels körs i tunneln, men för de sista två kilometrarna i omgivningsluft utanför tunneln. Detta motsvarar 48 % respektive 41 % av medelhalten utanför fordonen.

För exemplet utan luftutbytesstationer och där bussen ventileras ur direkt efter att den lämnat tunneln, blir halterna 0,79 respektive 0,37 mg/m<sup>3</sup>, vilket motsvarar 46 % och 21 % av halten utanför fordonen. Medelhalten i bussen är alltså betydligt lägre än filtreringseffektiviteten (50 %), på grund av att tunnelluftens inte hinner påverka halten i bussen under den tid som bussen är i tunneln.

Exemplet visar att både filtreringseffektiviteten och omsättningstiden av luften i fordonskupén påverkar halterna i fordonen. Med fungerande re-cirkulation blir givetvis utbytet av luften i fordonskupén väldigt långsamt.

Tabell 13. Indata till och resultat från beräkningarna med ekvation 1, som presenteras i Figur 26 och Figur 27.

	Exempel från Förbifartstunneln (motsvarar data i Figur 26)		Exempel på tunnel utan luftutbyte (motsvarar data i Figur 27)	
	<i>Personbil</i>	<i>Buss</i>	<i>Personbil</i>	<i>Buss</i> <sup>2</sup>
Antagen kupévolym	4 m <sup>3</sup>	40 m <sup>3</sup>	4 m <sup>3</sup>	40 m <sup>3</sup>
Omsättningstid <sup>1</sup>	11 min	111 min	11 min	111 min
Filtereffektivitet	50 %	50 %	50 %	50 %
Medelhalt i fordonskupé	1,05 mg/m <sup>3</sup>	0,89 mg/m <sup>3</sup>	0,79 mg/m <sup>3</sup>	0,37 mg/m <sup>3</sup>
Medelhalt i tunnel	2,19 mg/m <sup>3</sup>	2,19 mg/m <sup>3</sup>	1,72 mg/m <sup>3</sup>	1,72 mg/m <sup>3</sup>
Kvot kupé/tunnelhalt	0,48	0,41	0,46	0,21

<sup>1</sup> Definierad som kupévolym dividerat med ventilationsluftflöde.

<sup>2</sup> För bussen antas att halten vädras ur lika snabbt som personbilen direkt efter att den kommit ut från tunneln (t ex på grund av att dörrarna öppnas vid en hållplats).

## Slutsatser

Utifrån mätningarna i denna studie och andra studier kan följande generella slutsatser dras vad gäller partikel och sothalter i fordonskupéer och hur de relaterar till halterna utanför fordonen:

- Föga förvånande så kan man konstatera att halterna inuti fordonskupéerna beror på om kupéluften re-cirkuleras eller ventileras. Halterna av alla partikelmått är betydligt lägre vid **re-cirkulation** än då ventilationen är påslagen, detta gäller både studier i litteraturen och denna studie. I denna studie har ventilationen ställdts in på ca 75 % av maximal ventilation. Andra ventilationslägen har ej studerats
- I fallet med **re-cirkulation** har halterna utanför fordonen i stort sett ingen påverkan på halterna inuti fordonen. Interna källor kan då ha viss betydelse för halterna i fordonen. Detta gäller alla partikelmått, men sannolikt i mindre grad för sotpartiklar. Exakt vilka källorna är och dess betydelse varierar.
- Med **ventilationen påslagen** är påverkan på partikelhalten inne i fordonen av halten utanför beroende på vilket partikelmått som studeras.
  - Generellt kommer endast en liten andel av den största ( $>1 \mu\text{m}$ ) och allra minsta ( $<0,05 \mu\text{m}$ ) partikelfraktionerna av PM10 in i fordonskupén eftersom de fastnar i filter och ventilationssystem. Partiklar med en diameter däremellan har större chans att tränga in i kupén.
  - Om PM10 domineras av grova partiklar (uppvirvat vägdamm eller partiklar från dubbdäcksslitage) blir påverkan på halterna av PM10 i fordonskupén väldigt liten. I denna studie var halterna inne i fordonen är mindre än 10 % av halterna utanför.
  - För PM2,5 är påverkan av halterna utanför fordonen större eftersom partiklar  $<2,5 \mu\text{m}$  har större chans att ta sig in i fordonskupén jämfört med de som är större. I denna studie var halterna inne i fordonen är mindre än 25 % av halterna utanför.
  - Storleken på sotpartiklarna är sådan att de har större sannolikhet att påverka halterna inuti i fordonen jämfört med de allra största och allra minsta partiklarna. För Volvon med det modernaste ventilationssystemet av de studerade fordonen uppmättes att 41 % av halterna i kupén berodde på halterna utanför, men för äldre fordon och fordon med sämre filter kan en större andel av sotpartiklarna utanför fordonen komma in i kupén.
  - Om man mäter antalet partiklar så domineras de ofta av de allra minsta partiklarna som har mindre sannolikhet än sotpartiklarna att ta sig in i fordonskupén. I denna studie var halterna av antalet partiklar ( $>20 \text{ nm}$ ) mellan 40 % och 50 % av halterna utanför fordonen.
- Fordonsmodell, fordonstyp och ålder på fordonen har stor betydelse för i vilken grad omgivningshalterna påverkar halterna inne i fordonen.
  - Utifrån litteraturen kan det konstateras att det finns en viss tendens att senare årsmodeller har lägre halter av ultrafina partiklar inne i fordonen i

relation till utanför, men det finns undantag. Sökning i databaser för vetenskaplig litteratur visar dock att det är ganska få studier där man kan relatera halterna i fordonen till halterna utanför.

- Vår studie visar att den nya Volvon har lägre halter inne i kupén än de äldre personbilarna och en viktig orsak är sannolikt det speciella ventilationssystemet i Volvon, med relativt effektivt filter och avkänning av halterna av gasformiga föroreningar i ventilationsluften.
- Påverkan av de höga tunnelhalterna på halterna inuti bussen var relativt måttlig. Den långa luftutbytestiden av den stora volymen i bussen har sannolikt stor betydelse för halterna i bussen.

Vad gäller NO<sub>x</sub> kan halterna i fordonen vara nästan lika höga som i tunneln med ventilationen påslagen (75 % av maximal ventilation). För Volvon tycks NO<sub>2</sub>, som utgör ca 20 % av NO<sub>x</sub> halterna i Södra länken, till stor tas bort av ett specialfilter i bilen. Men i avsaknad av filter kan NO<sub>2</sub> halterna antas vara ungefär desamma som i tunneln om inte luften re-cirkuleras (detta har dock inte kunnat påvisas i denna studie).

## Referenser

Adams, H.S., M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, Determinants of fine particle (PM<sub>2,5</sub>) personal exposure levels in transport microenvironments, London, UK, Atmospheric Environment 35, 4557–4566, 2001.

Adams, H.S., M.J. Nieuwenhuijsen, R.N. Colvile, M.J. Older, M. Kendall, Assessment of road users' elemental carbon personal exposure levels, London, UK, Atmospheric Environment 36, 5335–5342, 2002.

Asmi E., M. Antola, T. Yli-Tuomi, M. Jantunen, P. Aarnio, T. Mäkelä, R. Hillamo, K. Hämeri, Driver and passenger exposure to aerosol particles in buses and trams in Helsinki, Finland, Science of the Total Environment 407, 2860–2867, 2009.

Bigazzi, A.Y., M.A. Figliozi, Impacts of freeway traffic conditions on in-vehicle exposure to ultrafine particulate matter, Atmospheric Environment 60, 495–503, 2012.

Boulter, P.G., I. S. McCrae, K. Taylor, Road tunnel air pollution monitoring, TRL Limited, Report PR/SE/746/03. Oppublicerad projektrapport, 2004.

Briggs, D.J., K. de Hoogh, C. Morris, J. Gulliver, Effects of travel mode on exposures to particulate air pollution, Environment International 34, 12–22, 2008.

Burman, L., Tunnelluftmätningar. Underlag FUD-projekt, Vägverket Region Stockholm. SLB rapport 1:2010, 2010 [http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb2010\\_001.pdf](http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb2010_001.pdf).

Chan, A.T., M.W. Chung, Indoor–outdoor air quality relationships in vehicle: effect of driving environment and ventilation modes, Atmospheric Environment 37, 3795–3808, 2003.

Cheng, Y.-H., Z.-S. Liu, C.-C. Chen, On-road measurements of ultrafine particle concentration profiles and their size distributions inside the longest highway tunnel in Southeast Asia, *Atmospheric Environment* 44, 763-772, 2010.

Gee, I.L., D. W. Raper, Commuter exposure to respirable particles inside buses and by bicycle, *The Science of the Total Environment* 235, 403-405, 1999.

Gladyszewska-Fiedoruk, K., Concentrations of carbon dioxide in the cabin of a small passenger car, *Transportation Research* D16, 327–331, 2011.

Gulliver, J., D.J. Briggs, Personal exposure to particulate air pollution in transport microenvironments, *Atmospheric Environment* 38 (1), 1–8, 2004.

Gulliver, J., D. J. Briggs, Journey-time exposure to particulate air pollution, *Atmospheric Environment* 41, 7195–7207, 2007.

Hänninen, O., Alm, S., Katsouyanni, K., Künzli, N., Maroni, M., Nieuwenhuijsen, M.J., Saarela, K. Srám, R.J., Zmirou, D., Jantunen, M.J. The EXPOLIS study: implications for exposure research and environmental policy in Europe. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* (impact factor: 2.72). 12/2004; 14(6):440-56.  
DOI:10.1038/sj.jea.7500342.

Hudda, N., E. Kostenidou, C. Sioutas, R. J. Delfino, S. A. Fruin, Vehicle and driving characteristics that influence in-cabin particle number concentrations, *Environmental Science and Technology* 45, 8691–8697, 2011, doi.org/10.1021/es202025m.

Johansson, C., K. Eneroöth, TESS - Traffic Emissions, Socioeconomic valuation and Socioeconomic measures. PART 1. Emissions and exposure of particles and NOx. Luftvårdsförbundet I Stockholms Uppsala län, 2007:2. SLB-rapport. Miljöförvaltningen, Stockholm, 2007, [http://www.slb.nu/slb/rapporter/pdf/lvf2007\\_2.pdf](http://www.slb.nu/slb/rapporter/pdf/lvf2007_2.pdf).

Johansson, C., C. Andersson, R. Bergström, P. Krecl, Exposure to particles due to local and non-local sources in Stockholm - Estimates based on modelling and measurements 1997 – 2006, ITM, SU report No:ITM report 175, 2008

Kaur, S., M. Nieuwenhuijsen, R. Colvile, Personal exposure of street canyon intersection users to PM<sub>2.5</sub>, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK., *Atmospheric Environment* 39, 3629e3641, 2005.

Knibbs, L.D., R.J. de Dear, L. Morawska, K.L. Mengersen, On-road ultrafine particle concentration in the M5 East road tunnel, Sydney, Australia, *Atmospheric Environment* 43, 3510-3519, 2009.

Knibbs, L.D., R.J. De Dear, A. Morawska , Effect of cabin ventilation rate on ultrafine particle exposure inside automobiles, *Environmental Science and Technology*, 44, 3546–3551, 2010.

Morawska, L., Z. Ristovski, E.R. Jayaratne, D.U. Keogh, X. Ling, Ambient nano and ultrafine particles from motor vehicle emissions: Characteristics, ambient processing and implications on human exposure, *Atmospheric Environment* 42, 8113–8138, 2008.

Pui, D.Y.H., C. Qi, N. Stanley, G. Oberdörster, Recirculating air filtration significantly reduces exposure to airborne nanoparticles, *Environmental Health Perspectives* 116, 863-866, 2008.

Qi, C., N. Stanley, D.Y.H. Pui, T.H. Kuehn, Laboratory and on-road evaluations of cabin air filters using number and surface area concentration monitors, *Environmental Science & Technology* 42, 4128-4132., 2008.

Riediker, M., R. Williams, R. Devlin, T. Griggs, P. Bromberg, Exposure to particulate matter, volatile organic compounds, and other air pollutants inside patrol cars, *Environmental Science & Technology* 37, 2084-2093, 2003.

Rim, D., J. Siegel, J. Spinhirne, A. Webb, E. McDonald-Buller, Characteristics of cabin air quality in school buses in Central Texas, *Atmospheric Environment* 42, 6453-6464, 2008.

Sandman, T., PM avseende planeringsmål och driftstrategier för luftkvalitet i Ringens vägtrafiktunnlar. VST infrateknik, 2007-01-11. Vägverket Region Stockholm, 2007.

SLB analys, Mätningar av luftföroreningar, luftflöden och trafik i Söderledstunneln november – december 1993, Stockholms Miljöförvaltning och Vägverket Region Stockholm. SLB rapport 4:1994. [http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb1994\\_004.pdf](http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb1994_004.pdf), 1994.

Xu, B., S. Liu, J. Liu, Y. Zhu, Effects of vehicle cabin efficiency on ultrafine particle concentration ratios measured in-cabin and on-roadway, *Aerosol Science and Technology*, 45:234–243, 2011, Doi: 10.1080/02786826.2010.531792.

Xu, B., Y. Zhu, Quantitative Analysis of the Parameters Affecting In-Cabin to On-Roadway (I/O) Ultrafine Particle Concentration Ratios, *Aerosol Science and Technology*, 43, 400–410, 2009.

Zagury, E., Y., Le Moullec, I. Momas, Exposure of Paris taxi drivers to automobile air pollutants within their vehicles. *Occupation and Environmental Medicine* 57 (6), 406–410, 2000.

Zielinski, M., H. Römmelt, G. Fruhmann, Ambient air soot concentrations in Munich public transportation systems, *Atmospheric Environment* 196, 107-110, 1997.

Zhu, Y., A. Eiguren-Fernandez, W.C. Hinds, A.H. Miguel, In-cabin commuter exposure to ultrafine particles on Los Angeles freeways, *Environmental Science and Technology* 41, 2138-2145, 2007.



SLB analys is a department of the Environment and Health Administration. We inform about current and future air quality and make

- environmental & health assessments in urban planning
- air quality and noise measurements
- air quality dispersion calculations for evaluation of source contributions and population exposures

SLB analys is the operator of the Stockholm & Uppsala Air Quality Management Association ([www.slb.nu/elvf](http://www.slb.nu/elvf))

---

**ISSN 1400-0806**

*SLB-analys*  
Environment and Health administration, Stockholm

Tekniska nämndhuset, Fleminggatan 4. Box 8136, 104 20 Stockholm

Tel +46 8-508 28 800, dir. SLB-analys +46 8-508 28 880

URL: <http://www.slb.nu>