

# *Halter i fordonskupéer vid färd i tunnel*

Christer Johansson, Max Elmgren, Beatrice Säll och Caroline Hagberg



Utfört på uppdrag av Trafikverket

SLB 48:2019

Uppdragsnummer	TRV 2017/118609
Daterad	2019-12-02
Handläggare	Christer Johansson, 076 1228931
Status	Granskad

## Förord

Mätningarna som presenteras i denna rapport har finansierats av Trafikverket (kontaktperson Tomas Holmström) och utgör ett kunskapsunderlag för att minimera hälsoeffekter på grund av trafikanters exponering för luftföroreningar i vägtrafiktunnlar. Mätningar är avsedda att komplettera tidigare mätningar i fordonskupéer (Johansson et al., 2013), med mätningar i nyare personbilar.

Mätningarna är genomförda av SLB-analys. Från SLB-analys har följande personer arbetat med projektet: Christer Johansson, Max Elmgren, Beatrice Säll, Caroline Hagberg, Billy Sjövall och Börje Norberg.



## Innehåll

<b>Sammanfattning</b> .....	7
Syften .....	7
Tidigare publicerade studier .....	7
Mätmetodik .....	7
Kupéhalter jämfört med tunnelhalter .....	7
TrafikanTERS exponering i fordonskupé .....	8
Förhållandet mellan sotpartiklar och NO <sub>x</sub> .....	8
Slutsatser .....	8
<b>Bakgrund</b> .....	10
Tidigare studier .....	10
Luftomsättning i fordon .....	11
Filters filtreringseffektivitet .....	11
Hälsostudier .....	12
<b>Metoder</b> .....	13
Luftföroreningsmätningar .....	13
Parallellmätningar .....	13
Instrumentjämförelser .....	13
Jämförelse av halter i framsäte och baksäte .....	14
Fordon .....	16
Färdväg och ventilation .....	17
Allmänt om sambandet mellan tunnelhalt och kupéhalt .....	17
<b>Resultat</b> .....	21
Uppmätta tidsvariationer i tunnelhalter .....	21
Omsättningstider för luften i fordonen .....	23
Kupéfiltrens effektivitet .....	24
Förhållandet mellan sotpartiklar och NO <sub>x</sub> .....	24
TrafikanTERS exponering i Södra länken .....	25
Osäkerheter .....	27
<b>Referenser</b> .....	29
<b>Appendix</b> .....	32
Halter i kupén med recirkulation aktiverat .....	32



## Sammanfattning

### Syften

Syftet med studien har varit att kvantifiera halter av NO<sub>x</sub> och sotpartiklar i fordonskupéer i relation till halterna utanför kupéerna vid färd i tunneln Södra länken. Ett annat syfte har varit att mäta i fordon av senaste års modeller för att se om resultaten skiljer sig från tidigare mätningar i äldre fordon. Resultaten ska ligga till grund för eventuella nya riktvärden för tunnelluften och även kunna användas som underlag för analyser av hälsoeffekter av exponering i tunnlar.

### Tidigare publicerade studier

Tidigare studier har visat att halterna inne i fordonskupéer i relation till halterna utanför fordonet framförallt beror på ventilationsinställningar och filtereffektiviteten. Ålder på fordonet och fordons hastigheten kan ha betydelse för luftläckage via otätheter; nyare fordon är tätare och hastigheten påverkar tryckskillnaden mellan kupén och utanför, vilket i sin tur påverkar läckaget. Normala kupéfilter har betydligt större betydelse för partiklar jämfört med NO<sub>x</sub> och NO<sub>2</sub>. Vissa nya fordonsmodeller har filter med aktivt kol vilket förefaller vara ett effektivt sätt att minska både partikel-, NO<sub>x</sub>- och kolvätehalter i fordonskupéer. En studie visade att partikelfilter med aktivt kol reducerade partikelhalterna med 74 % jämfört med 46 % utan aktivt kol. Med aktivt kol reducerades även NO<sub>2</sub> och kolvätehalterna med 75 % respektive 50 % jämfört med ofiltrerad luft.

När det gäller jämförelser av akut hälsopåverkan med eller utan filter finns mycket få studier. En studie visade mindre symptom och något förbättrad lungfunktion efter exponering för dieselavgaser efter aktivt kolfilter jämfört med utan filter. En annan studie kunde inte påvisa signifikanta skillnader i inflammationsmarkörer i blodet efter exponering med eller utan kupéfilter med aktivt kol.

### Mätmetodik

Batteridrivna instrument användes för samtidiga mätningar av NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, sotpartiklar och CO<sub>2</sub> i och utanför 10 olika personbilar vid färd genom Södra länken tunneln i Stockholm. Kontroller visade att instrumenten som mätte inne i och utanför bilen visade identiska värden då de mätte på samma luft. Två av de 10 bilarna registrerade 2017, fyra 2018 och fyra 2019. Varje bil färdades totalt 8 gånger genom tunneln. Ventilationen sattes på automatisk, med AC och kupétemperatur 20 grader. Dessutom mättes halterna vid recirkulation. Luftintaget inne i kupén placerades mellan stolarna fram. Jämförelser för ett fordon visade att halterna i baksätet var desamma med viss tidsförskjutning.

### Kupéhalter jämfört med tunnelhalter

Den maximala kupéhalten i förhållande till den maximala tunnelhalten kan ses som en indikation på hur effektivt respektive fordons filter är. Variationen mellan fordonen var stor. För sotpartiklar var den maximala kupéhalten mellan 10 % och 60 % av maximala tunnelhalten. Detta tyder på att det är stor skillnad på fordonens filtereffektivitet för sot. Filtereffektiviteten för NO<sub>x</sub> var betydligt lägre än för sot (50 % - 75 %).

År 2012 mättes sotpartiklar i en personbil och en buss. Mätningen i personbilen visade att halten inne i kupén var 41 % av halten utanför (i tunneln). För NO<sub>x</sub> var halten 77 % av halten i tunneln. I bussen var sotpartikelhalten bara 23 % av halten i tunneln, men avgörande för detta var den långa omsättningstiden för luften i bussen.

### **Trafikanter exponering i fordonskupé**

Den totala exponeringen för trafikanter som färdas genom en tunnel beror både på hur stor andel av tunnelhalten som tränger in i fordonskupén (beroende på filtereffektiviteten) och på omsättningstiden för luften i kupén. Omsättningstiden är viktig för hur snabbt den förhöjda halten i kupén (på grund av tunnelpassagen) vädras ut efter att fordonet lämnat tunneln.

Mätningar visade att omsättningstiderna för luften var mellan 1 och 2 minuter, vilket innebär att luften hann bytas ut inne i tunneln eftersom det tog 4 minuter att passera tunneln.

Den totala exponeringen i kupén varierade beroende på bilmodell. Mätningarna av sotpartiklar visade att en trafikant exponeras för mellan 20 % och 80 % av den exponeringen som skulle skett utanför fordonet. För NO<sub>x</sub> var exponeringen i kupén mellan 80 % och nästan 100 % av den exponering som halten utanför fordonet skulle medfört.

Ca 20-40% av sotpartikelexponeringen skedde efter att fordonen passerat ut ur tunneln. För NO<sub>x</sub> skedde ca 30 – 45% utanför tunneln. Att skillnaden mellan bilarna är större för sot än för NO<sub>x</sub> beror troligtvis till störst del på att filteregenskaperna varierar mer mellan bilarna för sot.

### **Förhållandet mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub>**

Halterna av NO<sub>x</sub> i tunnelluften utgör ”hälsoindikator” på trafikanternas exponering för avgaspartiklarna (inklusive sotpartiklar) och har föreslagits som styrande för ventilation av vägtunnlar. Eftersom det är exponeringen inne i fordonen som är avgörande för hälsoeffekterna är det också viktigt att ta hänsyn till hur förhållandet mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub> ser ut både i tunnelluften och inne i fordonskupéerna.

Mätningarna visade att medelkvoten mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub> i tunnelluften för alla genomfarter i Södra länken var  $12.2 \pm 1.1$  mg/g NO<sub>x</sub>. Detta kan jämföras med HBEFA modellens kvot för den aktuella hastigheten och fordonssammansättningen på 4.3 mg Sot/g NO<sub>x</sub>, knappt 3 gånger lägre än den uppmätta, vilket visar att det är viktigt att övervaka de verkliga förhållandena för att inte underskatta hälsopåverkan. Men medelkvoten inne i fordonen var  $7.1 \pm 1.9$  mg sot/g NO<sub>x</sub>, ca 60 % av sot/NO<sub>x</sub> kvoten i tunneln, vilket beror på att en mindre andel av sotpartiklarna passerar in i fordonen jämfört med NO<sub>x</sub>.

### **Slutsatser**

Mätningarna på 10 bilar av årsmodell 2017 – 2019 visar:

- Halterna i fordonskupéerna uppvisade en stor variation; Den högsta kupéhalten av sotpartiklar varierade mellan 10 % och 60 % av den maximala halten i tunnelluften, vilket avspeglar variationen i filterreningseffektivitet. För NO<sub>x</sub> var intervallet 50 % till 75 %.
- I likhet med tidigare mätningar blir kupéhalterna i stort sett opåverkade av tunnelluften om ventilationen sätts på recirkulation.
- Både omsättningstiden för luften i fordonskupéerna och effektiviteten av kupéfilter är viktiga för kvantifiering av den totala exponeringen för tunnelluften. En lång omsättningstid leder till mer inverkan av exponering när fordonet



passerat ut ur tunneln (tar längre tid att byta ut tunnelluften inne i kupén). När tunnelpassagen är längre än omsättningstiden så kontrollerar filtrets effektivitet till stor del hur kraftig exponeringen blir för en given maximalhalt i tunneln.

- För de flesta fordonen var det stor skillnad i förhållandet mellan halten i tunnelluften för NO<sub>x</sub> och sotpartiklar. I genomsnitt var förhållandet i tunnelluften ca 12 mg sotpartiklar/g NO<sub>x</sub> och ca 8 mg/g inne i kupéerna, dvs 60 % lägre. Eftersom HBEFA modellen underskattar förhållandet mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub> i tunnelluften är det viktigt att kontrollera detta med mätningar.
- En litteraturstudie visar att det finns få studier som rapporterar samtliga mätningar av halterna inne i fordonskupé och utanför. Relationen påverkas bl a av fordons ålder och typ av filter.
- Likaså är det få studier som utvärderat hälsoeffekter av exponering inne i fordon med olika typer filter. Exponering i fordon med aktivt kolfilter tycks minska akuta hälsopåverkan, vilket ligger i linje med att kupéhalterna av partiklar, NO<sub>x</sub> och kolväten är lägre än utan kolfilter.

## Bakgrund

I takt med att fler vägtunnlar byggs kan exponeringen för avgas- och slitagegenererade partiklar minska för det stora flertalet men öka för biltrafikanter som färdas i tunnarna. Pendlare och andra vägtrafikanter är direkt exponerade för trafikrelaterade utsläpp. I takt med ökad restid i tunnlar ökar även exponeringstiden för tunnelluft som vägtrafikanterna färdas genom.

Syftet med studien har varit att kvantifiera halter av NO<sub>x</sub> och sotpartiklar i fordonskupéer i relation till halterna utanför kupéerna vid färd i tunneln Södra länken. Avsikten är också att kunna generalisera resultaten. Vilken exponering utsätts trafikanterna för i tunnlar? Är nya bilar mer skyddande än gamla?

### Tidigare studier

Hur höga halterna av luftföroreningar blir i tunnlar beror på trafikintensitet, körförhållanden (hastigheter, köer etc), fordonssammansättning, tunnelns lutning, på-och avfarter samt ventilationen. Exponeringstiden i tunnlar är kort jämfört med tiden längs vägar utomhus, men halterna är betydligt högre i tunnlar. Samtidigt filtreras luften som ventilerar fordonen. Hur vi exponeras för luftföroreningar vid färd genom en vägtunnel beror, i huvudsak på tre faktorer:

- Halt av luftföroreningar i tunneln
- Hur lång tid man vistas i tunneln
- Fordonets skyddande effekt

Halter inne i fordon beror på ventilationsinställning och filteregenskaper, meteorologiska parametrar, fordonets hastighet, fordonsflottans sammansättning, trafikflödet. (Ham et al., 2017; Knibbs et al., 2010; Knibbs et al., 2011).

Olika gasformiga luftföroreningar har olika reaktivitet och därmed olika sannolikhet att fastna på tex filterytor. Olika partiklar har olika storlek vilket har stor betydelse för depositionen av partiklar och penetrationen genom filter. Ventilationen av fordonen påverkas av ventilationsinställningarna, otätheter i dörrar, fönster etc samt tryckskillnader mellan kupén och utomhusluften, vilken i sin tur påverkas av bilens hastighet. Tunnlar är stängda utrymmen med begränsad ventilationsförmåga där höga halter av trafikrelaterade utsläpp uppmätts i flera studier. Det som skyddar trafikanter mot de hälsofarliga utsläppen är bilens förmåga att stänga ute partiklar och gaser. Vilket i sin tur ställer krav på fordonets förmåga att filtrera bort eller stänga ute de hälsofarliga luftföroreningarna.

Pendling kan bidra väsentligt till individens dagliga totala exponering av luftföroreningar (Ham et al., 2017, Knibbs et al., 2011; Knibbs et al., 2010; Leavey et al., 2017). Exponeringen varierer beroende på färdmedel (Ham et al., 2017; Merritt et al., 2019). Pendlare och yrkestrafik som taxi utsätts för liknande halter i sina fordon (Yu et al., 2017; Zhu et al., 2008; Hudda et al., 2011). Den stora skillnaden mellan yrkestrafik och vardagspendlare är exponeringstiden. Enligt Yu et al. (2017) exponeras taxichaufförer i Los Angeles 6 gånger mer för liknande halter inne i fordonskupén som pendlare i södra Kalifornien.

## Luftomsättning i fordon

Flertalet tidigare studier har undersökt den exponering som pendlare utsätts för och jämfört exponeringen beroende på sättet man transporterar sig. De flesta studier av den typen har fokuserat på partiklar, ofta ultrafina partiklar (UFP <100 nm i diameter). Tåg, bil, buss och cykling är de vanligast förekommande fordonstyperna som undersökt, även spårvagn och pendling till fots förekommer i vissa studier (Ham et al., 2017; Knibbs et al., 2011; Leavey et al., 2017).

Tidigare studier som publicerats har även visat att luftomsättningen i fordon påverkas främst av fläktinställningar, öppna/stängda fönster och fordonskupévolymen, men kan till viss del påverkas av t ex fordonets hastighet, fabrikat och årsmodell. Ott et al. (2007) rapporterade mellan 0.92 och 79 luftutbyten per timme beroende på ventilationsinställningar, fönster öppna eller stängda mm. Varierad ventilationsinställning är vanligt förekommande metod för att undersöka hur exponeringen av luftföroreningar varierar inom samma fordonstyp (bilmärke). Kombinationen av ventilationsinställningar varierar mellan studier men vanligt är att alla eller vissa av följande inställningar jämförs med varandra: öppet fönster, AC på, ventilation på och AC av samt recirkulation. (Abi-Esber & El-fadel, 2013; Jain, 2016; Knibbs et al., 2010; Lee et al., 2015; Johansson et al., 2013). Omsättningstiden för luften i fordonskupén är starkt beroende av fordonets hastighet och om fläkten är inställd på recirkulation. Om fläkten å andra sidan är inställd på att ta in luft utifrån beror omsättningstiden till störst del på fläktinställningen (Hudda et al., 2011).

Säsong och omgivning har betydelse för halten i kupén. (Jain, 2016) Uppmätta halter i kupén ökar väsentligt vid trafikstockning. (Jain, 2016; Joodatnia et al., 2012). En del studier jämför nyare och äldre bilmodeller (Abi-Esber & El-fadel, 2013; Johansson et al., 2013; Knibbs et al., 2010). Studierna visar att fordonets ålder påverkar halten i kupén, men på vilket sätt är utifrån rådande litteratur inte entydigt. Ett relevant resultat från dessa studier är att nyare bilar är generellt tätare än äldre. Vid färd i tunnlar kan detta leda till lägre halter av partiklar (PM<sub>2.5</sub>) i kupén i nya bilar jämfört med gamla, samtidigt som utvädringen av föroreningar tar längre tid i en tätare bil (vid samma ventilationsinställning).

Enligt en studie är uppmätta kupéhalter av UFP väsentligt högre under färd i tunnlar jämfört med uppmätta kupéhalter i andra studier utförda på öppen väg. (Knibbs et al., 2010) Johansson et al. (2013) utförde kupémätningar i fem olika fordon, 3 personbilar en van samt en buss, i Södra länken under år 2012. Mätningar utfördes dels med ventilationen inställd på näst högsta läget och dels med recirkulation aktiverat. Studien såg att partikelhalter inne i kupén påverkas mycket lite av utomhusluften då recirkulation är på. När ventilationen är på påverkas halten i kupén av utomhusluften men hur stor påverkan är beror på partikelstorlek. Studien såg också att antalet partiklar i fordonskupén korrelerade väl med antalet i tunneln. Även kupéhalten av NO<sub>x</sub> korrelerade väl med halten i tunneln. Sot mättes i en av personbilarna samt i bussen, resultatet av mätningarna var att kupéhalten var ca 41 % av tunnelhalten i personbilen och ca 23% i bussen när ventilationen var på. Halten inte påverkades av utomhusluften när recirkulation var aktiverat i personbilen (Johansson et al., 2013). Med re-cirk på kan de höga halterna inne i kupén hindras, men däremot kan då höga halter av CO<sub>2</sub> ackumuleras i bilen (Gladyszewska, 2011; Jung et al., 2017; Silvergren et al., 2013).

## Filters filtreringseffektivitet

Olika kupéfilter har olika effektivitet att filtrera partiklar o gaser. För partiklar är partikelstorleken avgörande. De grova partiklarna (>1 µm) och de allra minsta (<0.1 µm) filtreras i högre grad än partiklar mellan dessa storlekar. Luftflödes hastigheten genom filtret påverkar filtreringseffektiviteten; hög lufthastighet minskar filtreringseffektiviteten. Efterhand som filtret sätter igen p g a partiklar som fastnat ökar tryckfallet överfiltret vilket har påvisats öka halterna av partiklar i fordonskupéer för samma halt utanför bilen (Xu et al. (2011). Detta antas bero på att luft läcker in på andra vägar i kupén. Nyare bilars filter

är generellt bättre än äldre vilket kan bidra till lägre halter i nyare bilar jämfört äldre (Abi-Esber & El-fadel, 2013; Johansson et al., 2013).

### Hälsostudier

Idag finns det begränsat forskningsunderlag för vilka långtidseffekter som kan uppkomma med exponering av höga halter under kortare tider, som exempelvis färd genom en längre vägtunnel. Det finns tidigare studier som fokuserat på hälsorelaterade problem kopplade till luftföroreningar. Direkta hälsoeffekter under exponering av förorenad luft kan visa sig i form av illamående, nedsatt lungfunktion, förhöjt blodtryck, yrsel samt irritation i näsa, ögon och hals.

Madl et al. (2015) undersökte påverkan på lungfunktionen med syfte att bedöma exponeringen av UFP i vägtunnel samt beräkna lungdepositionen för bilister. Resultaten från studien visade partikelhalterna minskade med 88% om bilen kördes genom tunneln med recirkulationsinställningen och AC på i bilen än uppmätt tunnelhalt. Beräkningarna av inhalede partikelhalter utfördes med en deterministisk modell som slumpmässigt väljer genom Monte Carlo metod geometrin av inhalede partiklars transport i luftvägarna (Hofmann and Koblinger (1990)). Genom den maximala filtreringsinställning, recirkulation och AC på beräknas depositionen av partiklar i lungor att minska med 95% om uppmätt kupéluft användes i modellen jämfört med tunnelluft.

Andra hälsorelaterade problem som blodtryck har studerats i Young et al (2019) där 16 friska personer körde i Seattles stadskärna under 4 dagar, varav hälften av dagarna med/utan partikelfilter i bilen. I studien mättes partiklar, NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> samt O<sub>3</sub>. Likt andra studier visade mätresultat utan filter signifikant högre partikelhalter än dom dagarna som mättes med filter, men inte lika signifikant för NO<sub>2</sub>. Blodtrycket hos visade sig starkt korrelerat med filtreringseffekten i bilarna. Högt blodtryck var associerad med höga partikelhalter. Det visade sig även i kombination med höga NO<sub>2</sub> halter blev partikelexponeringens effekt högre. Slutsatserna utifrån studien var att inhalera trafikrelaterade utsläpp ökar blodtrycket.

Studier har även gjorts på blandad grupp med allergiska/ icke allergiska personer. I Muala et al (2011) undersöktes en blandad grupp och deras direkta hälsopåverkan under exponering av dieslavgaser. Studien utfördes i en kontrollerad miljö i en sk exponeringskammare med ofiltrerad/filtrerad luft med UFP-filter med/utan aktivt kol. Studien resulterade entydigt i mindre symptom hos hela testgruppen mellan helt ofiltrerad luft och filtrerad luft samt att halterna av UFP, NO<sub>2</sub> och HC var betydligt lägre. Skillnaderna mellan filter med UFP och UFP-filter med aktivt kol var liten men inte försumbar. Tester visade en något förbättrad lungfunktion efter exponering med aktiv kol-filter än utan.

Att kolfilter förbättrar luften i bilkupér har visats i flera studier. Bland annat i Muala et al (2011) undersöktes liknande som i Muala et al (2014), fast här även med inflammationsmarkörer i blodet efter exponering av dieslavgaser i exponeringskammare. Partikelfilter utan aktivt kol reducerade partikelhalterna med 46%, och med aktivt kol 74% jämfört med ofiltrerad luft. Med aktivt kol reducerades även NO<sub>2</sub> och HC med 75 respektive 50% jämfört med ofiltrerad luft. Även här signifikant skillnad på upplevelse med och utan filtrerad luft. Däremot visades att dieslavgaserna inte gav signifikant skillnad i inflammationsmarkörerna i blodet före/efter exponering under något scenario.

Ytterligare studier relaterade till hälsoeffekter av exponering för (kortvarigt) förhöjda halter av NO<sub>2</sub> och partiklar sammanfattas av Sandström et al. (2003) respektive Bellander et al. (2017) samt även Orru et al. (2014, 2015 och 2016).

## Metoder

### Luftföroreningsmätningar

Batteridrivna instrument för mätning av NO, NO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, sotpartiklar och CO<sub>2</sub> har använts (Tabell 1). Två NO<sub>x</sub> och sotinstrument samt tre CO<sub>2</sub> instrument användes. Ett av vardera instrumenttyp registrerade halterna i tunnelluften utanför bilen och ett halterna inne i fordonskupén. Luften utanför bilen sögs in av instrumenten via rör genomföringar i en tunn specialtillverkad plastplatta, som monterades i fönsterrutan och tätades med tejp (se Figur 3). Mätningen inne i bilen gjordes mellan framsätena i andningshöjd. Koldioxidhalten i tunnelluften mättes även direkt vid luftintaget (luftmunstyckena) på instrumentpanelen inne i bilen.

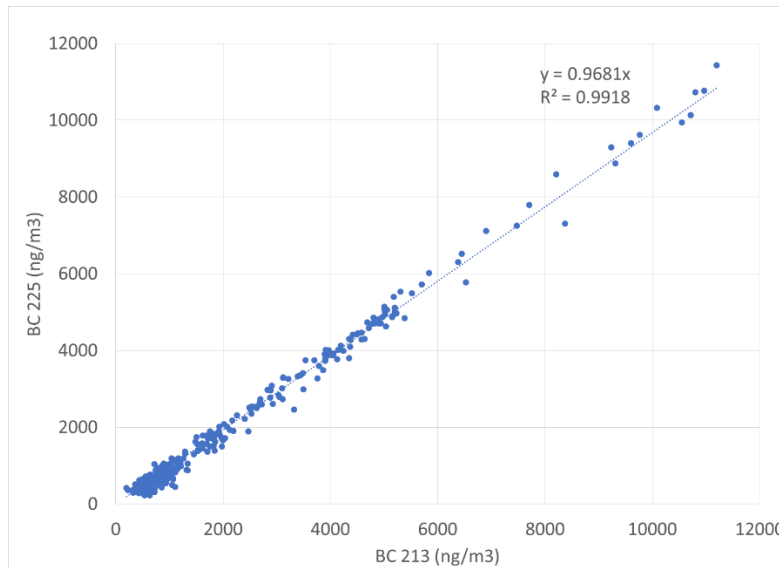
**Tabell 1.** Instrument som använts vid mätningarna.

Ämne	Instrument	Mätprincip
NO, NO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	Model 405 nm NO <sub>2</sub> /NO/NO <sub>x</sub> Monitor™ 2B Technologies, 2100 Central Ave., Suite 105, Boulder, Colorado 80301, USA	Ljusabsorptionen av NO <sub>2</sub> vid 405 nm våglängd. NO oxideras till NO <sub>2</sub> med hjälp av ozon.
Sotpartiklar	Aethalometer, microAeth® Model AE51, AethLabs San Francisco, California	Mätning av transmissionen av ljus 880 nm våglängd genom ett filter.
CO <sub>2</sub>	SENSEAIR K33 LP T/RH	NDIR ljusabsorption

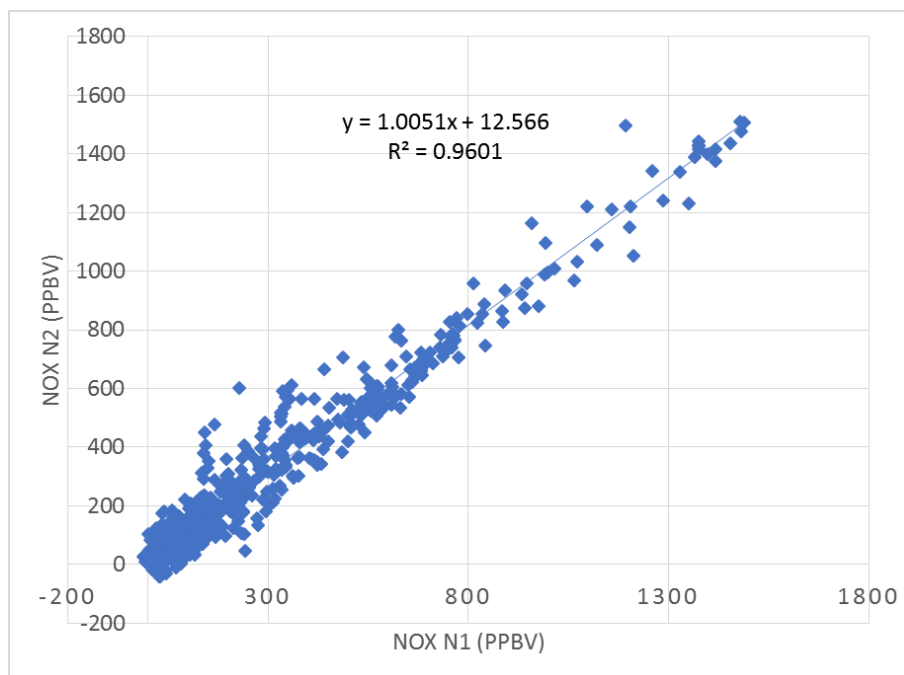
### Parallellmätningar

#### Instrumentjämförelser

För att säkerställa att instrumenten som mätte inne i kupén och utanför fordonet gav jämförbara värden genomfördes parallellmätningar av sotpartiklar, NO<sub>x</sub> och CO<sub>2</sub>. Figur 1 och Figur 2 visar på god överensstämmelse för NO<sub>x</sub> och sotpartiklar.



**Figur 1.** Parallellmätning av de två instrumenten för mätning av sotpartiklar i och utanför kupén (2019-09-09).



**Figur 2.** Parallellmätning av de två instrumenten för mätning av  $NO_x$  i och utanför kupén (2019-08-30).

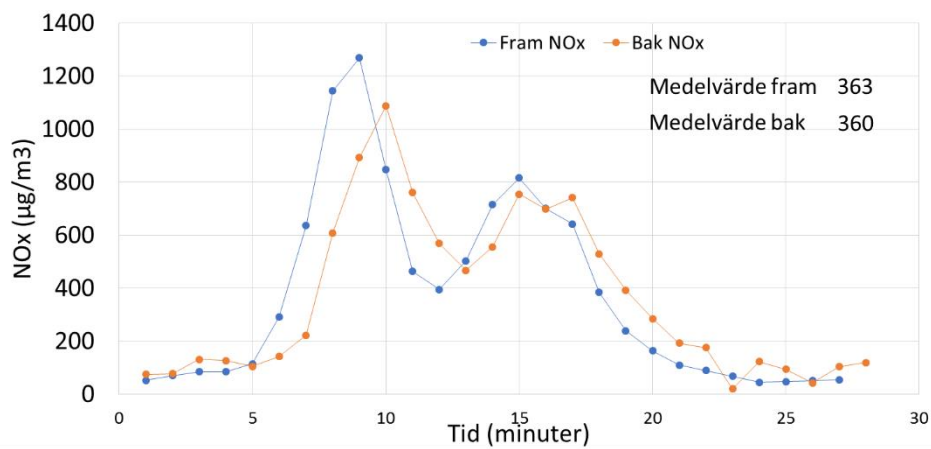
#### Jämförelse av halter i framsäte och baksäte

I samtliga fordon mättes halterna av  $NO_x$  i fordonskupén mättes i andningshöjd mellan framsätena (Figur 3). Eftersom luften i kupén inte är perfekt omblandad, som antas i beräkningarna, genomfördes parallella mätningar i framsäte och baksäte i Mitsubishi. Figur 4 visar att medelhalterna var i stort sett identiska. Däremot är det en liten tids förskjutning i halterna. Mätningen av halterna i framsätet sker närmare luftintagen i instrumentpanelen, vilket kan betyda att luften omsätts lite snabbare där jämfört med längre bak i bilen.





**Figur 3.** Luftinsugens placering i och utanför bilen samt övrig mätutrustnings placering.



**Figur 4.** Samtidiga mätningar av NO<sub>x</sub> halterna i fordonskupén i andningshöjd mellan framsätena och i andningshöjd i mitten av baksätet.

## Fordon

Tio olika fordon har använts (Tabell 2). Kriterier för urval har varit att de ska vara av senaste årsmodell, några premiumbilar och några ”vanliga”, olika utformning av filterlösningar för ventilationen.

**Tabell 2.** Lista över fordon som använts i studien.

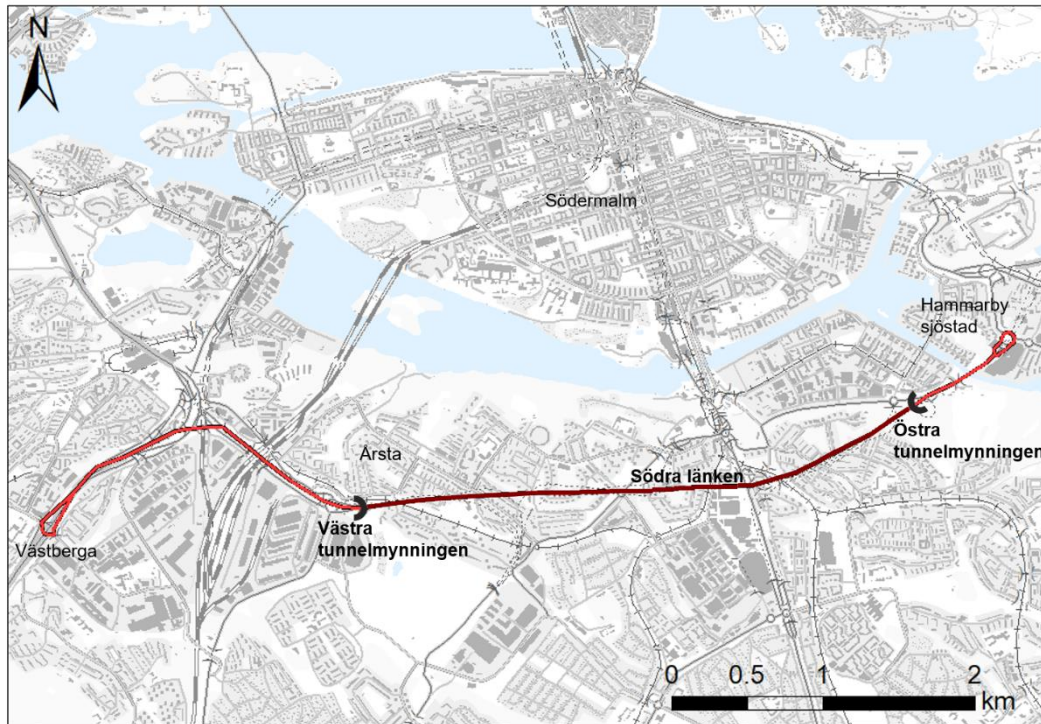
Modell, bränsle	Årsm odell	Kaross/tjänstevi kt/passagerare/ Motoreffekt	CO <sub>2</sub> vid blandad körning, g/km	Partiklar vid blandad körning, mg/km	NO <sub>x</sub> vid blandad körning, mg/km	Luftfilter
<b>Volvo V60, hybrid</b>	2018	Kombi, 1666 kg, 4 p., 112 kW	138 (NEDC)	2.4 (NEDC)	21.3 (NEDC)	
<b>Seat Leon, diesel</b>	2018	Kombi, 1586 kg, 4 p., 85 kW	156 (WLTP)	0.08 (WLTP)	45.4 (WLTP)	
<b>Kia Ceed, bensin</b>	2019	Kombi, 1475 kg, 4 p., 103 kW	144 (WLTP)	0.47 (WLTP)	14.9 (WLTP)	
<b>BMW 525</b>	2019	Halvkombi, 4 p., 170 kW	131 (WLTP)	-	-	
<b>Seat Tarraco, diesel</b>	2019	Kombi, 1921 kg, 6 p., 140 kW	194 (WLTP)	0.14 (WLTP)	54.4 (WLTP)	
<b>Renault Zoe, el</b>	2017	Halvkombi, 4 p., 1570 kg, 68 kW	-	-	-	
<b>Subaru Forester, bensin</b>	2019	Kombi, 1614 kg, 4 p., 110 kW	199 (WLTP)	i u	22.9 (WLTP)	
<b>Volkswagen Passat, laddhybrid</b>	2018	Kombi, 1827 kg, 4 p., 115 kW bensin, 85 kW El	40 (NEDC)	I u	4.6 (NEDC)	
<b>Audi Q3, bensin</b>	2018	Kombi, 1760 kg, 4 p., 140 kW	198 (WLTP)	0.31 (WLTP)	34.5 (WLTP)	
<b>Misubishi Outlander, laddhybrid</b>	2017	Kombi, 1929 kg, 4 p., 89 kW bensin, 120 kW El	41 (NEDC)	I u	3.3 (NEDC)	



## Färdväg och ventilation

Alla fordon färdades samma sträcka enligt karta nedan (Figur 5). Varje fordon kördes 4 gånger västerut och 4 gånger österut (totalt 8 tunnelpassager). Fordonshastigheten var i genomsnitt ca 70 km/h.

Ventilationen sattes på automatisk AC med 20 grader i fordonskupén. Dessutom mättes halterna med recirkulation (presenteras i Appendix).



Figur 5. Karta över färdsträckan.

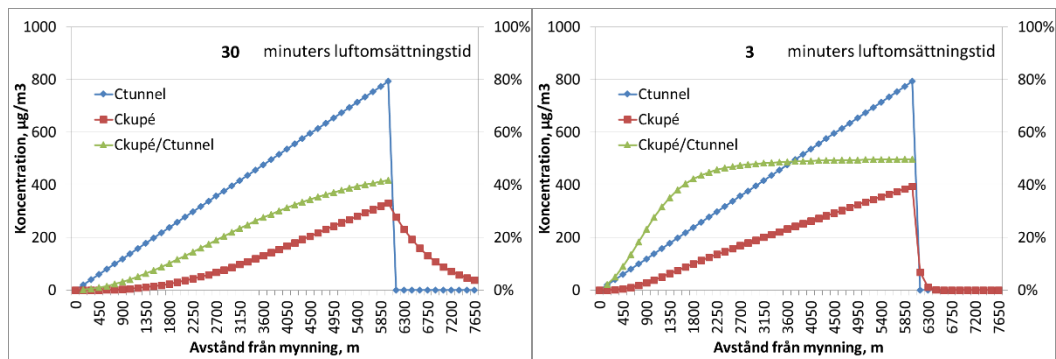
## Allmänt om sambandet mellan tunnelhalt och kupéhalt

Figur 6 illustrerar det teoretiska sambandet mellan halten i fordonskupén och halten i tunneln utanför fordonet beroende på avståndet från mynningen och omsättningstiden för luften i fordonet. Förhållandet mellan halten i fordonskupén och halten utanför fordonet närmar sig ett konstant värde som är lika med andelen av tunnelhalten som kommer in i kupén (huvudsakligen beroende på filtereffektiviteten). Hur snabbt detta konstanta förhållande ställer in sig beror på omsättningstiden för luften i fordonskupén. För en 6 km lång tunnel och ett fordon som färdas i 70 km/h med 50 % filterupptag blir förhållandet mellan halten i kupén och halten i tunneln ca 40 % om omsättningstiden är 30 minuter, d.v.s. förhållandet når aldrig 50 %. Vid 3 minuters omsättningstid blir förhållandet 50 % och konstant redan efter ca 3 km.

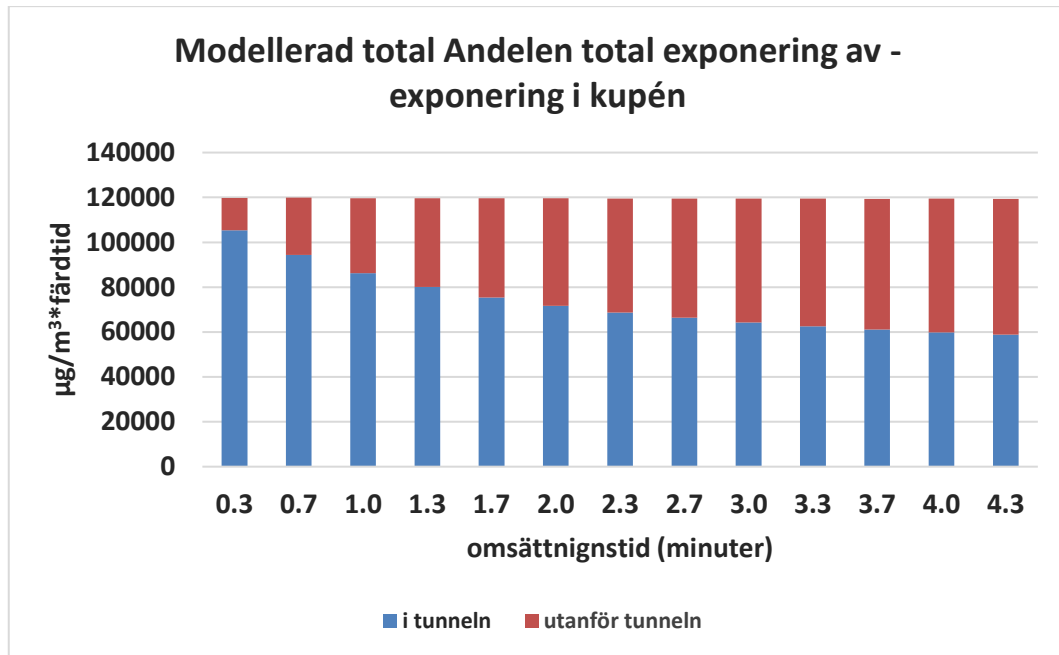
Det är alltså viktigt att notera att förhållandet mellan halten inne i kupé och utanför bilen kan variera kraftigt.

Exponeringen i fordonskupén, den halt personer i kupén utsätts för över tid, varierar beroende på omsättningstid, filteregenskaper, halt i utomhus- och tunnelluften samt vistelsetid i tunneln. Inne i tunneln ökar luftföroreningshalten på grund av att det begränsade utrymmet hindrar omblandning och utspädning av luften. Halten i kupén ökar i takt med att utomhushalten ökar, kontrollerat av fordonets omsättningstid och filteregenskaper. När fordonet lämnar tunneln sjunker halten utomhus hastigt. Halten i kupén sjunker med varierande hastighet främst beroende på omsättningstiden. Detta innebär att exponeringen av luftföroreningar till följd av tunnelpassagen fortsätter även efter att man har lämnat tunneln. Figur 6 illustrerar detta, avklingningen efter utfart ur tunneln är långsammare och pågår under längre tid i fallet då omsättningstiden är 30 minuter jämfört med fallet då omsättningstiden är 3 minuter. Ju längre omsättningstid, desto längre blir exponeringen till följd av tunneln, efter utfart. Å andra sidan gäller även att ju längre omsättningstid desto lägre blir halten i bilden under tiden i tunneln eftersom en mindre mängd kommer in i kupén. Även detta illustreras i Figur 6, maximala halten i kupén är lägre då omsättningstiden är 30 minuter jämfört med då den är 3 minuter trots att halten i omgivningsluften är den samma i de båda fallen. Resultatet blir att den totala exponeringen beroende på enbart omsättningstid inte skiljer sig mycket åt mellan fordon. Detta eftersom personer i fordonet exponeras av en lägre halt men under längre tid då fordonet har lång omsättningstid och vice versa då omsättningstiden är kortare. Andelen av den totala exponeringen som sker utanför tunneln ökar med ökande omsättningstid. Detta resultat syns i den teoretiska modellen av  $\text{NO}_x$  där filterkapaciteten antas vara konstant, se Figur 7.

I resultatet från testbilarna i Södra länken varierar den totala exponeringen mellan fordonen och skillnaden i exponering mellan bilarna. Detta bedöms bero till stor del på filterkapaciteten eftersom alla bilar som testats haft betydligt kortare omsättningstid än tiden för en tunnelpassage vilket innebär att luften i kupén hunnit bytas ut inne i tunneln. Olika typer av filter är olika effektiva och därför skiljer sig exponeringen i tunneln åt mellan de olika testbilarna.



**Figur 6.** Illustration av hur halten i fordonskupén (röd) varierar i tunneln och strax utanför fordonet (blå) i en 6 km lång tunnel. Förhållandet mellan halten i kupén och i tunneln närmar sig ett konstant värde som är lika med andelen som passerar filtret, i detta fall ansattes 50 %. Luftomsättningen i kupén är 30 minuter i vänstra figuren och 3 minuter i högra figuren.



**Figur 7.** Illustration av hur andelen exponering utanför tunneln av den totala exponeringen teoretiskt kan variera med ökande omsättningstid. Färdtiden är tiden från infart i tunneln till tiden då halten i kupén, efter utfart ur tunneln, återgått till vad den var vid infart.

Halterna i olika fordonskupéer i slutet av Södra länkentunneln beror på omsättningstiden för luften i fordonen. Denna beror i sin tur på fordonskupéns volym i förhållande till volymflödet för ventilationsluften. För ett litet fordon med högt ventilationsflöde kommer förhållandet mellan halten i fordonskupén och tunneln att snabbt närma sig andelen som passerar genom luftfiltret.

Vi har valt att ställa in ventilationen på Automatisk AC (Air Condition) med 20 grader i fordonskupén för alla fordon. Detta innebär att olika fordon kommer att ha olika luftvolymflöden som kan bero på omgivningstemperaturen i förhållande till kupétemperaturen. Omsättningstiden för luften i fordonskupén ( $\tau$ ) kan uppskattas baserat på hur snabbt halten minskar direkt efter att fordonet passerat ut ur tunneln. Förändringen i halten i fordonskupén beror flödet in via ventilationen minus flödet ut via ventilationen minus depositionen (upptaget) på väggar o andra ytor inne i bilen:

$$\frac{dC_{kupé}}{dt} = \frac{1}{\tau} [(1 - \varphi)C_{omgivning} - C_{kupé}] - \frac{1}{\tau_d} C_{kupé}$$

Där  $\tau_d$  är tidsskalan för depositionen. Precis efter att fordonet passerat ut ur tunneln är kupéhalten mycket högre än omgivningshalten. Om omgivningshalten försummas i förhållande till kupéhalten kan kupéhalten skrivas som:

$$\frac{dC_{kupé}}{dt} = -[C_{kupé}] \left[ \frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_d} \right]$$

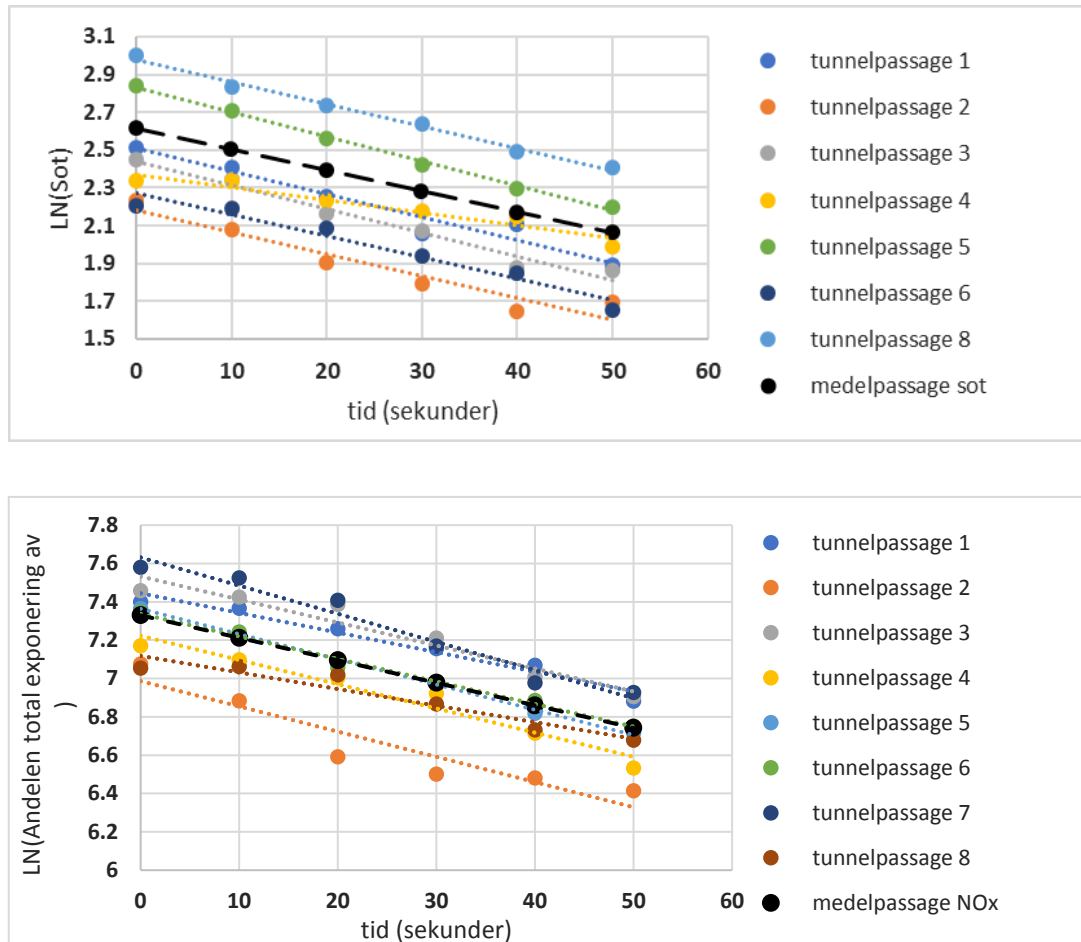
Integrering ger hur halten i kupén avklingar på grund av ventilation och deposition:

$$C_{kupé} = C_{kupé}^{t=0} e^{-\left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_d}\right)t}$$

Eller

$$\ln(C_{kupé}) = \ln(C_{kupé}^{t=0}) - \left(\frac{1}{\tau} + \frac{1}{\tau_d}\right)t$$

Genom att plotta  $\ln(C_{kupé})$  mot tiden erhålls summan av de karakteristiska tiderna för ventilation och deposition från lutningen. Exempel visas i Figur 8.



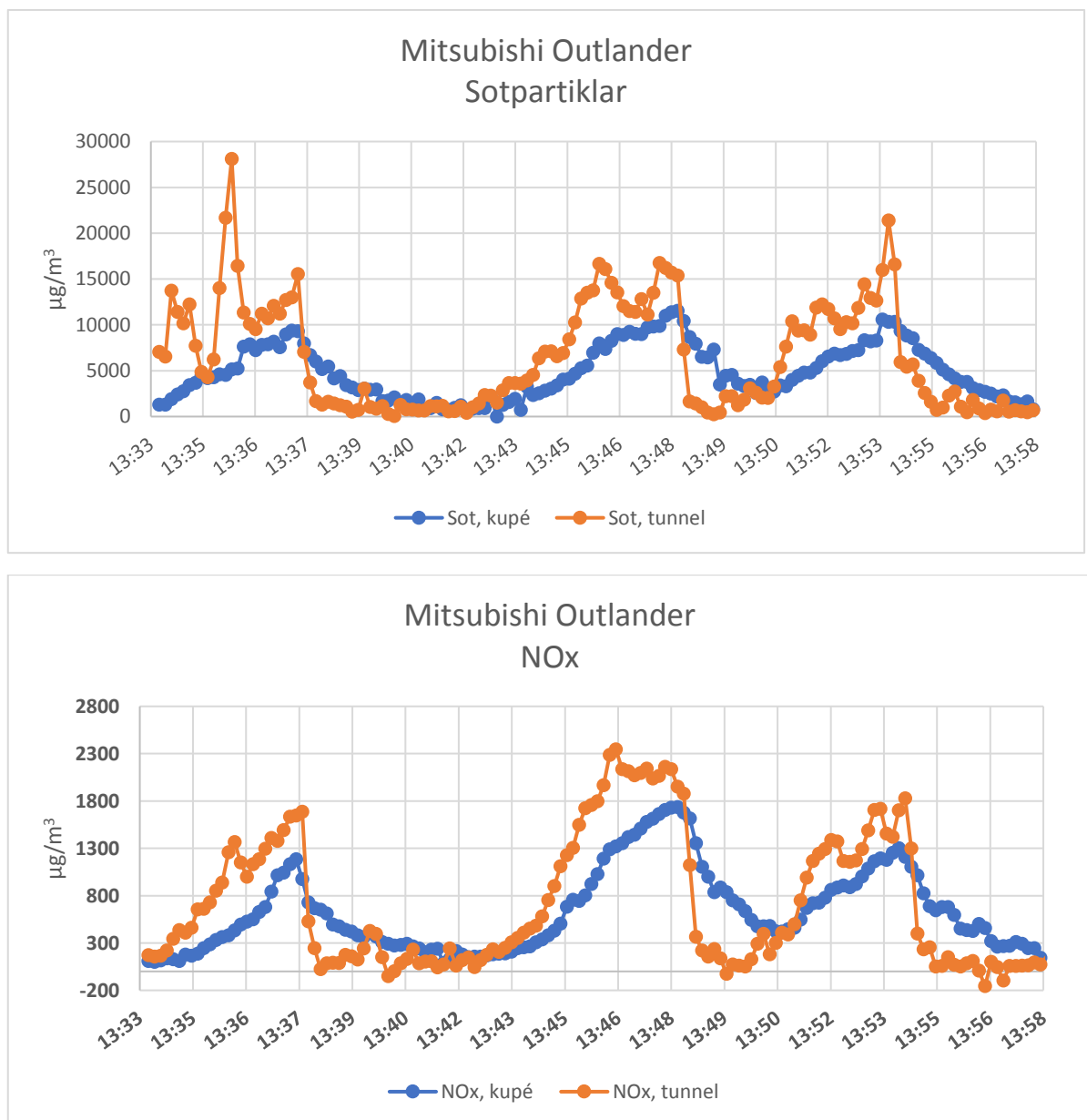
Figur 8. Logaritmen av halten sot (övre plotten) respektive NO<sub>x</sub> (nedre plotten) som funktion av tiden efter att Mitsubishi'n lämnat tunneln.

NO<sub>x</sub> har låg depositions hastighet gentemot de flesta ytor och kan därför anses försumbar, vilket betyder att avklingningen för NO<sub>x</sub> avspeglar luftomsättningen. Av Figur 6 framgår att med 3 minuters luftomsättningstid når kvoten mellan halten i fordonskupén och halten i tunneln ett konstant värde efter ca 3 km. Denna kvot är ett mått på filtreringseffektiviteten.

## Resultat

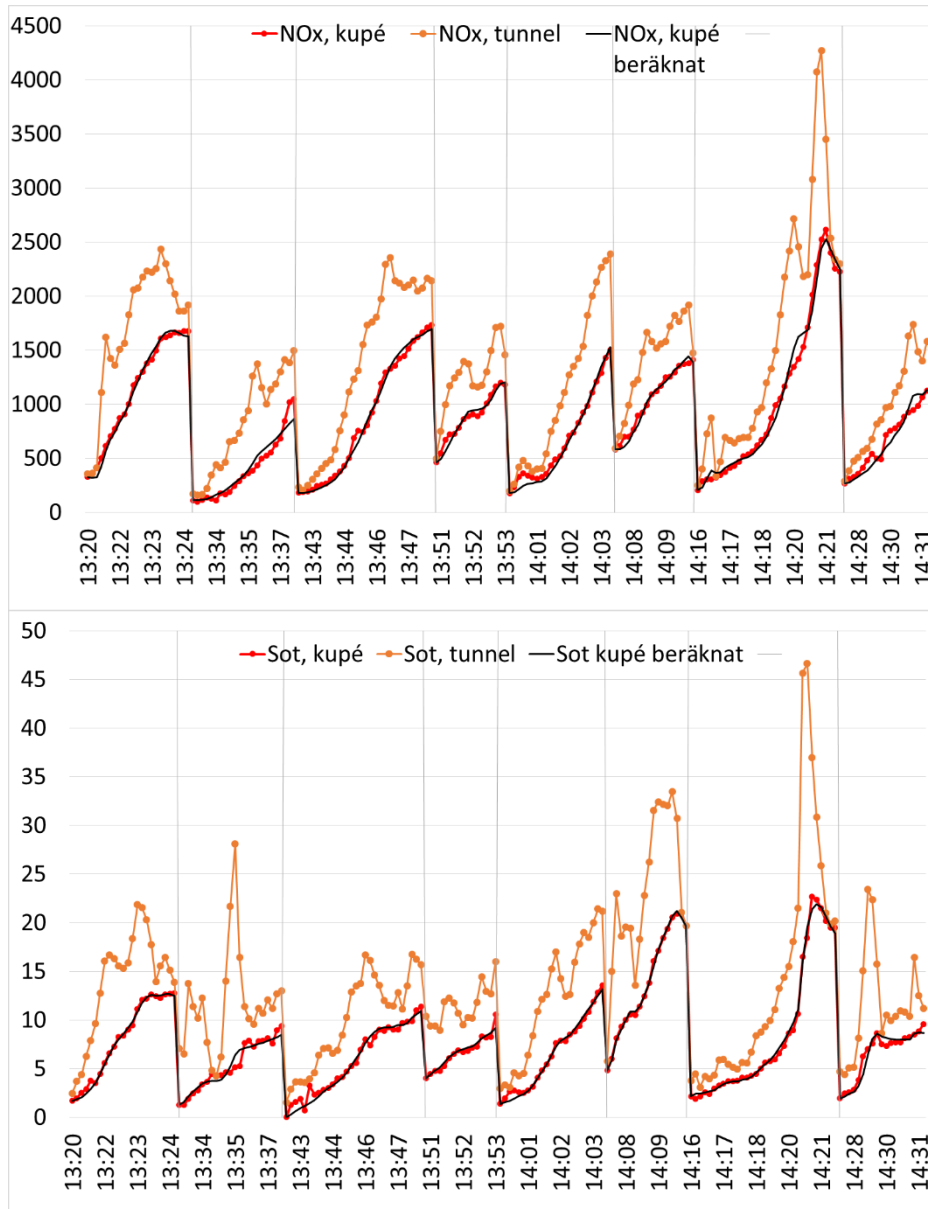
### Uppmätta tidsvariationer i tunnelhalter

Figur 9 visar hur de uppmätta halterna av sotpartiklar och  $\text{NO}_x$  varierar utanför och i fordonskupén på Mitsubishi Outlander i samband med att fordonet färdas i och utanför tre av Södra länkens tunnelavsnitt. Halterna inne i fordonskupén ökar kontinuerligt i takt med att halten i tunneln ökar ju längre in i tunneln som bilen färdas. När bilen passerat ut ur tunneln sjunker kupéhalten långsammare än halten utanför kupén beroende på hur snabbt luften i kupén ventileras ut. Omsättningstiden för luften i kupén beror på fordonskupéns volym och ventilationsluftens hastighet. Detta visar att halterna i fordonskupén kommer att vara högre än omgivningshalterna under en kort period efter att fordonen passerat ut ur tunneln. Tidsutvecklingen i halterna för  $\text{NO}_x$  och sotpartiklar är mycket likartade eftersom ventilationen är densamma.



Figur 9. Exempel på variation i halter av sotpartiklar och  $\text{NO}_x$  utanför och inne i fordonskupé vid färd i och utanför tre av Södra länkens tunnelavsnitt.

Figur 10 visar mätta och beräknade tidsvariationerna i halterna i och utanför kupén för alla tunnelpassager men exklusive den tid då bilen befinner sig utanför tunnelavsnitten; totalt 8 tunnelpassager, 2 gånger per tunnelavsnitt. De beräknade kupéhalterna stämmer mycket väl med de uppmätta. Kupéhalten av sotpartiklar i förhållande till tunnellufthalten är lägre än  $\text{NO}_x$  halten i förhållande till tunnellufthalten. Detta beroende på att sotpartiklarna filtreras effektivare än  $\text{NO}_x$  i luftfiltret.

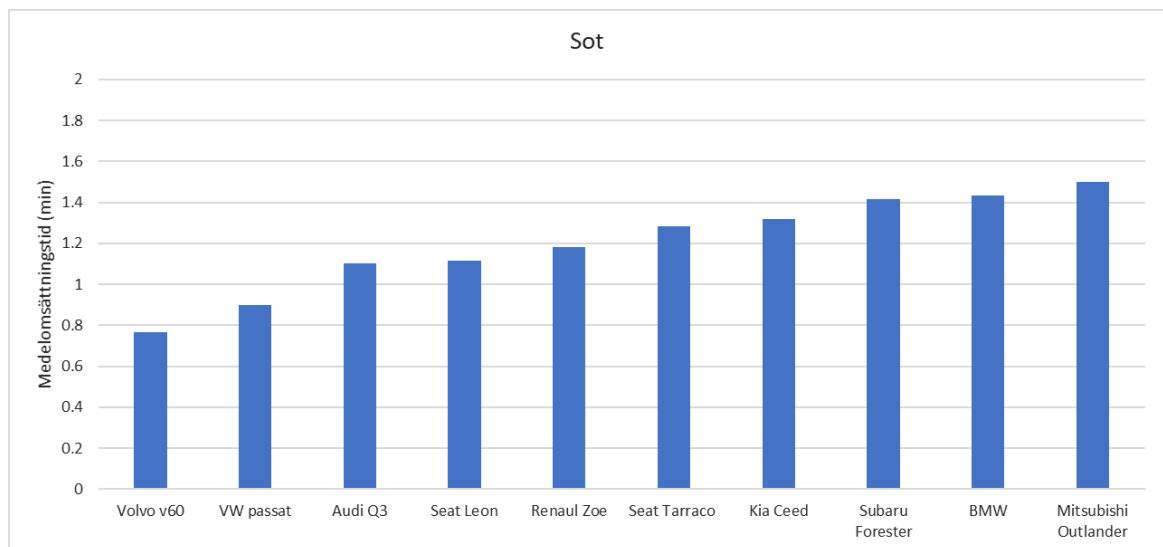


**Figur 10.** Halter av sotpartiklar och  $\text{NO}_x$  i tunnel och fordonskupé vid färd med Mitsubishi Outlander i Södra länkens tunnlar. De heldragna svarta linjerna är beräknade kupéhalter med optimala värden på luftomsättning och filterupptag.

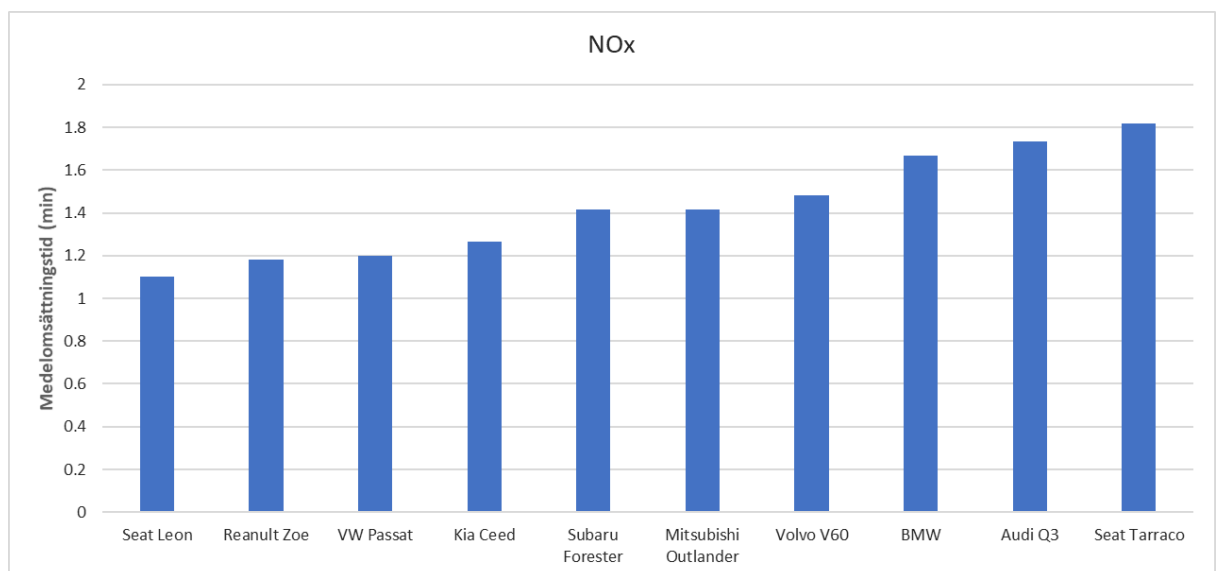
### Omsättningstider för luften i fordonen

Beräknade omsättningstider för NO<sub>x</sub> baserat på avklingningen av NO<sub>x</sub> halterna i fordonskupéerna vid utfart från tunneln varierade mellan 1.1 och 1.8 minuter (Figur 12). Detta innebär att luften i bilen hinner bytas ut inne i tunneln eftersom det tar ca 4 minuter att passera genom Södra länken.

Omsättningstiden är inte samma för sot och NO<sub>x</sub> för respektive fordonstyp, se Figur 11 och Figur 12. Variationen beror till viss del på deposition av sot inne i fordonen, vilket inte sker i någon nämnvärd utsträckning för NO<sub>x</sub>. Variationen beror också på att omsättningstiden är ett beräknat medelvärde av tunnelpassagera. BMW:n har troligtvis ett system med automatisk recirkulation som slås på under vissa förhållanden.



Figur 11. Luftomsättningstider av sot i de olika fordonen.



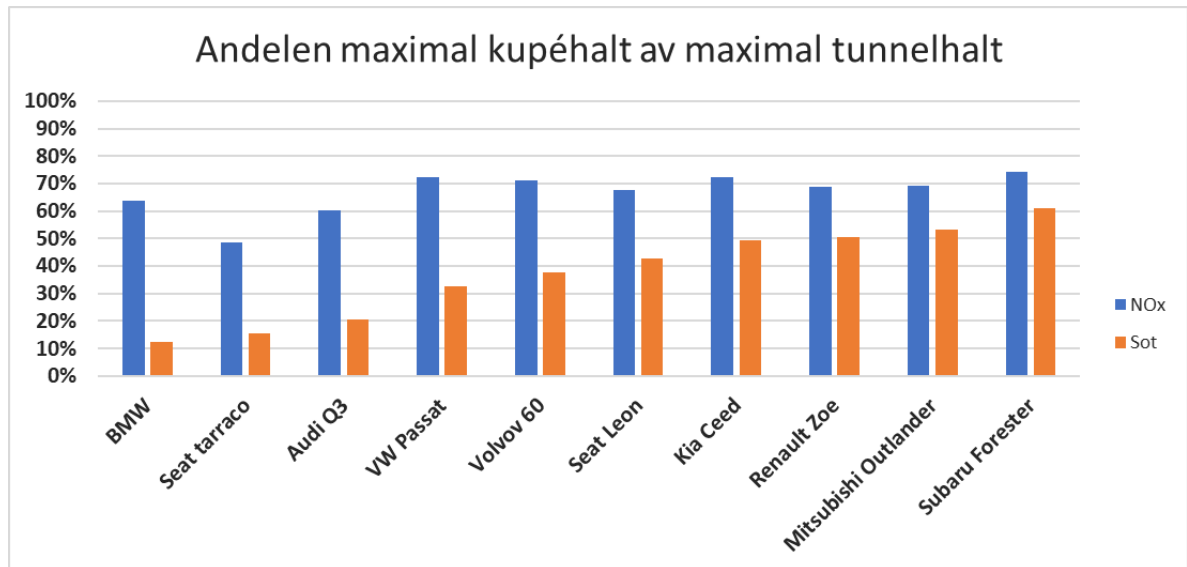
Figur 12. Luftomsättningstider av NO<sub>x</sub> i de olika fordonen.



### Kupéfiltrens effektivitet

Figur 13 illustrerar kvoten mellan den maximala kupéhalten och den maximala tunnelhalten. Detta kan ses som en indikation på hur effektivt respektive fordons filter är.

Variationen mellan fordonen är stor för sot, maximala kupéhalten är mellan 10 % och 60 % av maximala tunnelhalten. Detta tyder på att det är stor skillnad på fordonens filtereffektivitet för sot. Även för NO<sub>x</sub> varierar denna kvot, dock inte lika mycket som för sot. Filtereffektiviteten för NO<sub>x</sub> är betydligt lägre än för sot och inte proportionell mot den för sot för en given biltyp.



Figur 13. Medelandelan maximal kupéhalt av maximaltunnelhalt av sot (orange) och NO<sub>x</sub> (blå) för respektive biltyp.

### Förhållandet mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub>

Halten av NO<sub>x</sub> har föreslagits som styrande för luftkvaliteten i vägtunnlar, inte på grund av direkta hälsoeffekter utan främst som indikator på exponeringen för avgaspartiklar, inklusive sotpartiklar. Eftersom det är exponeringen inne i fordonen som är avgörande för hälsoeffekterna är det också viktigt att ta hänsyn till hur förhållandet mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub> ser ut både i tunnelluften som övervakas och inne i fordonskupéerna.

Den genomsnittliga kvoten mellan sotpartiklar och NO<sub>x</sub> i tunnelluften för alla genomfarter i Södra länkens tunnelavsnitt var  $12.2 \pm 1.1$  mg/g NO<sub>x</sub> (Tabell 3). Detta avspeglar förhållandet i avgasutsläppen och kan jämföras med emissionsmodellen HBEFA. Med antagande om jämnt flytande trafik och medelhastigheten 67 km/h blir den totalt viktade kvoten 4.3 mg Sot/g NO<sub>x</sub> enligt HBEFA (version 4.0). D v s knappt 3 gånger lägre än den uppmätta.

Tabell 3 visar även den genomsnittliga kvoten mellan sot och NO<sub>x</sub> halterna i fordonskupéerna för de olika bilarna under körningarna i tunnelavsnitten. Kvoterna i fordonen är lägre än i tunnelluften, vilket avspeglar att en mindre andel av sotpartiklarna passerar in i fordonen jämfört med NO<sub>x</sub>. I genomsnitt är sot/NO<sub>x</sub> kvoten i kupéerna  $7.1 \pm 1.9$  mg sot/g NO<sub>x</sub>. Detta är ca 60 % av sot/NO<sub>x</sub> kvoten i tunneln.



**Tabell 3.** Sammanställning av sambanden mellan kupé- och tunnelhalter för sotpartiklar och NO<sub>x</sub> beräknade baserat på linjära regressionser mellan halterna. De sista två kolumnerna visar de genomsnittliga sot/NO<sub>x</sub>-kvoterna i tunnelluften och i kupéluften vid körning genom tunnelavsnitten.

Modell, år	Kupé/Tunnel Sot	Kupé/Tunnel NO <sub>x</sub>	Kupé/Tunnel NO <sub>2</sub>	Kupé/tunnel Sot/NO <sub>x</sub>	Medelkvot sot/NO <sub>x</sub> i Tunnel (mg sot/gNO <sub>x</sub> )	Medelkvot sot/NO <sub>x</sub> i Kupé (mg sot/gNO <sub>x</sub> )
<b>Volvo V60, hybrid</b>	0.53	0.80	0.14	0.75	15.7	9.4
<b>Seat Leon, diesel</b>	0.49	0.77	0.16	0.18	13.9	7.9
<b>Kia Ceed, bensin</b>	0.47	0.70	0.73	0.53	12.1	8.0
<b>BMW 525</b>	0.26	0.99	0.67	0.073	10.8	1.7
<b>Seat Tarraco, diesel</b>	0.13	0.35	0.045	0.41	10.5	3.0
<b>Renault Zoe, el</b>	0.51	0.59	0.12	0.43	11.5	8.6
<b>Subaru Forester, bensin</b>	0.73	0.69	1.02	0.99	11.1	9.5
<b>Volkswagen Passat, laddhybrid</b>	0.57	0.89	0.46	0.62	11.3	5.6
<b>Audi Q3, bensin</b>	0.24	0.67	0.29	0.40	10.9	3.7
<b>Misubishi Outlander, laddhybrid</b>	0.65	0.80	0.72	0.70	12.3	9.7
<b>Medelvärde av alla utom Seat Tarraco</b>	0.49 ± 0.11	0.77 ± 0.08	0.48 ± 0.21	0.52 ± 0.19	12.2 ± 1.1	7.1 ± 1.9

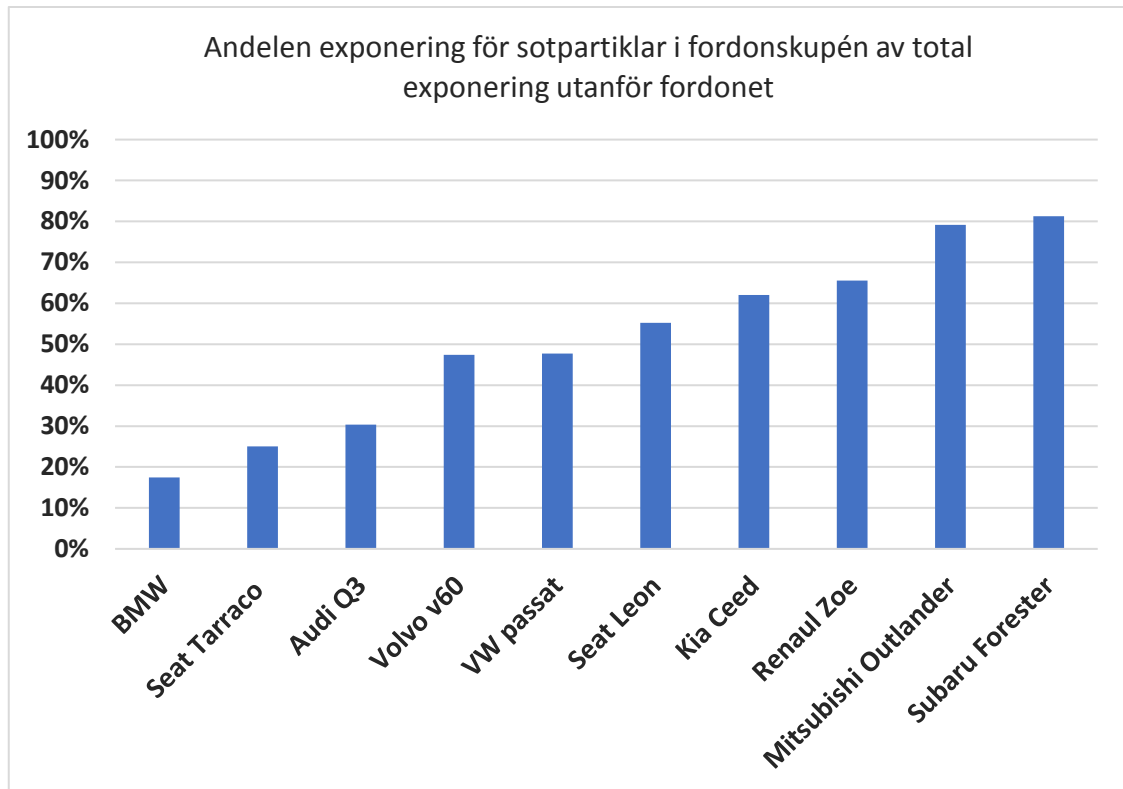
### Trafikanter exponering i Södra länken

Den totala exponeringen i kupén har beräknats som kupéhalten under tiden från tunnelinfart till då att halten i kupén är 20 % av vad den var vid tunnelutfart. Den verkliga exponeringen pågår troligtvis något längre tid men ju längre tid efter tunnelutfarten som inkluderas desto större blir osäkerheten i påverkan från tunnelexponeringen. Totala exponeringen utanför bilen är beräknad för samma tid som exponeringen i kupén. Totala tiden varierar mellan tunnelpassagerna beroende på trafikflöde och på omsättningstiden för luften i fordonskupén. Totala exponeringen är ett medelvärde av fyra passager (av totalt åtta) för varje bilmodell. Detta eftersom det var endast vid passage från Hammarby till Årsta som halten hann ventileras ut ur bilen i tillräckligt hög grad för att ge ett representativt resultat. I de övriga fyra passagerna var det för tätt mellan tunnel ut- och infart för att kunna bedöma den totala exponeringen.

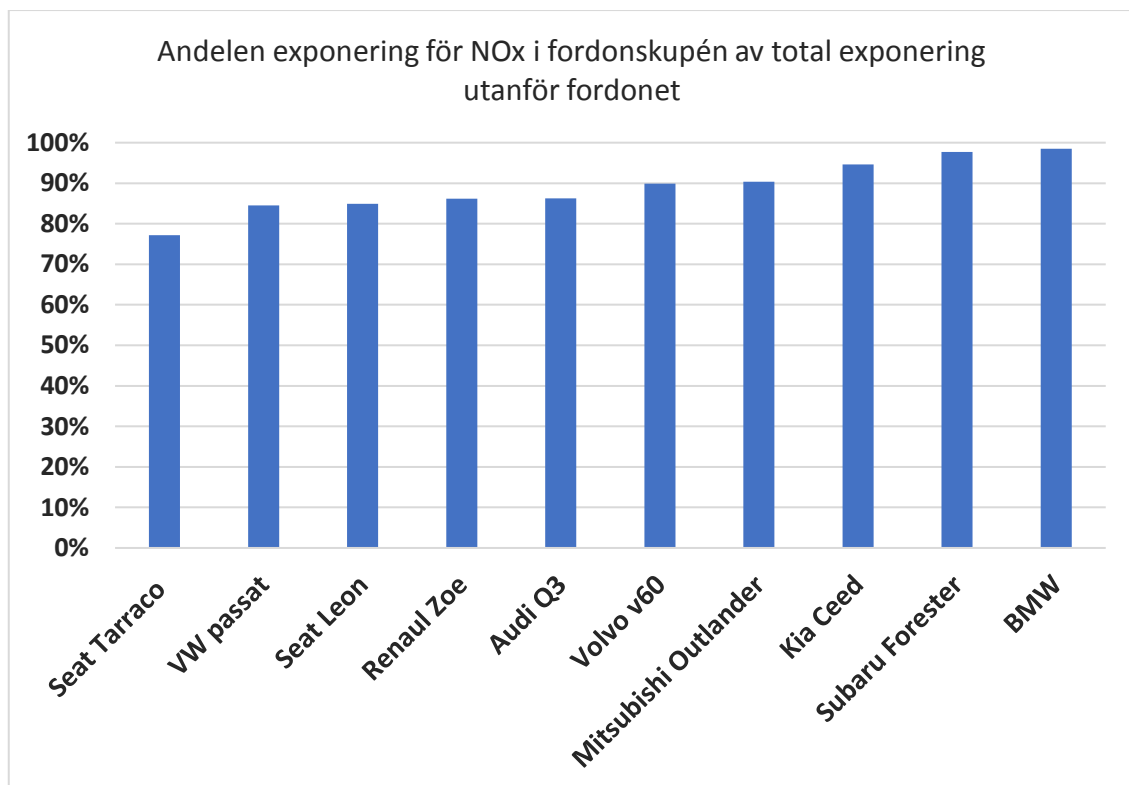
Figur 14 visar att det är stor variation i den totala exponeringen i kupén beroende på bilmodell; en trafikant exponeras för mellan 20 % och 80 % av exponeringen som skulle skett utanför fordonet. Enligt Figur 15 är variationen mindre för NO<sub>x</sub> jämfört med för sot. Filteregenskaper samt aktivering av automatisk recirkulation (som observerats i fallet med BMW:n) bedöms påverka den totala exponeringen till stor del eftersom det gör att halten i fordonet hålls nere under tunnelpassagen.

Figur 16 och Figur 17 redovisar uppmätt medelandel av den totala kupéexponeringen som inträffar efter utfart ur tunneln för sot respektive NO<sub>x</sub>. Intervallet mellan lägsta och högsta andel är något större för sot än för NO<sub>x</sub> (ca 20-40% respektive ca 30 – 45%). Att skillnaden

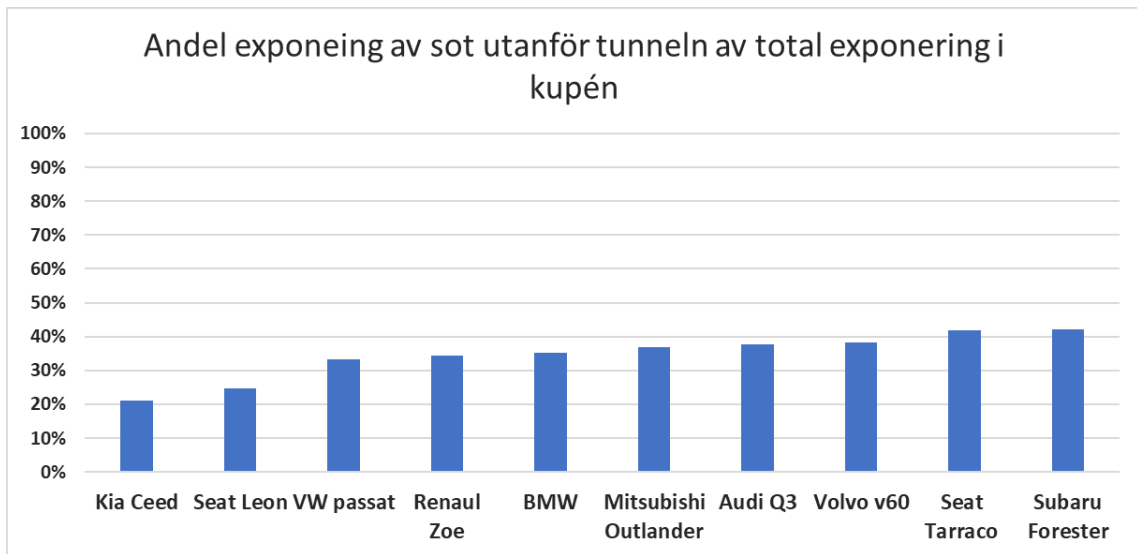
mellan bilarna är större för sot än för NO<sub>x</sub> beror troligtvis till störst del på att filteregenskaperna varierar mer mellan bilarna för sot.



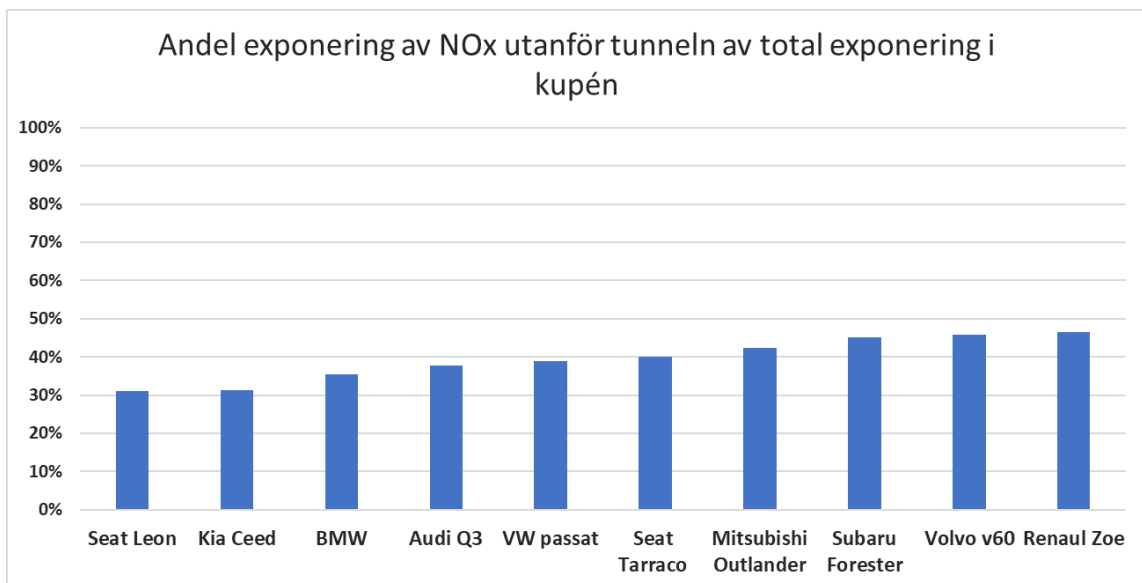
Figur 14. Andelen totala exponering för sot i kupén av totala exponeringen utanför bilen.



Figur 15. Andelen totala exponering för NO<sub>x</sub> i kupén av totala exponeringen utanför bilen.



**Figur 16.** Medelandelen av den totala kupéexponeringen av sot som sker efter tunnelutfart.



**Figur 17.** Medelandelen av den totala kupéexponeringen av NO<sub>x</sub> som sker efter tunnelutfart.

### Osäkerheter

I mätresultatet finns osäkerheter så som att halterna i och utanför tunneln varierar mellan de olika passagera, tiden i tunneln varierar på grund av varierande trafikflöde, toppar av både NO<sub>x</sub> och sot uppstår ibland utanför tunneln på grund av att bilar med sämre avgasrening kör in på vägen. På grund av det varierande trafikflödet stiger halten i tunneln inte heller linjärt alla passager eftersom det ibland blir trafikstockning. Det faktum att det var höga toppar av både NO<sub>x</sub> och sot utanför tunneln bidrar till osäkerhet i estimeringen av bilarnas omsättningstid samt exponeringen till följd av tunneln. Där av har medelvärden av tunnelpassagera använts i analysen.



## Referenser

- Abi-Esber, L. & El-fadel, M. (2013). Indoor to outdoor air quality associations with self-pollution implications inside passenger car cabins. *Atmospheric Environment*, Vol. (81), sid 450-463. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2013.09.040
- Sandström, T., Forsberg, B. och Bylin, G. Air quality in road tunnels; Health effects of Nitrogen Dioxide and aspects on CO-pollutants; Luftkvalitet i tunnlar - Hälsoeffekter av kväveoxid och aspekter på andra luftföroreningar. Vägverket, 2003:64. [https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10417/RelatedFiles/2003\\_64\\_air\\_quality\\_road\\_tunnels.pdf](https://trafikverket.ineko.se/Files/sv-SE/10417/RelatedFiles/2003_64_air_quality_road_tunnels.pdf).
- Bellander, T., B. Forsberg och C. Johansson (2015). Kardiovaskulär påverkan vid kortvarigt höga halter av avgaspartiklar. Centrum för arbets- och miljömedicin, Stockholms läns landsting. Rapport 2015:3
- Gladysewska, K. (2011) Concentrations of carbon dioxide in the cabin of a small passanger car. Elsevier, Vol 16, sid 327-331. DOI: 10.1016/j.trd.2011.01.005
- Ham, W., Vijayan, A., Schulte, N., Herner, J.D. (2017). Commuter exposure to PM<sub>2.5</sub>, BC, and UFP in six common transport microenvironments in Sacramento, California. *Atmospheric Environment*, Vol (167) sid 335-345. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.08.024>
- Hofmann, W. & Koblinger, L. (1990). Monte Carlo Modelling of Aerosol Deposition in Human Lungs. Part II: Deposition Fractions and Their Sensitivity to Parameter Variations. *Journal of Aerosol Science*, vol. (21), sid 675–688. DOI: 10.1016/0021-8502(90)90122-E
- Hudda, N., Kostenidou, E., Sioutas, C., Delfino, R.J., Fruin, S.A. (2011). Vehicle and driving characteristics that influence in-cabin particle number concentrations. *Environmental Science & Technology*, Vol (45), 8691-8697. DOI: <https://doi.org/10.1021/es202025m>
- Jain, S. (2016). Exposure to in-vehicle respirable particulate matter in passenger vehicles under different ventilation conditions and seasons. *Sustainable Environment Research*, Vol (27), sid 87-94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.serj.2016.08.006>
- Johansson, C., S. Silvergren, M. Norman och B. Sjövall (2013). Halter av partiklar och NO<sub>x</sub> i fordon i relation till omgivningsluftens halter - Underlag för skattning av trafikantexponering. SLB-Rapport 1:2013. [http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb2013\\_001.pdf](http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb2013_001.pdf).
- Joodatnia, P., Kumar, P., Robins, A. (2012). The behaviour of traffic produced nanoparticles in a car cabin and resulting exposure rates. *Atmospheric Environment*, Vol (65), sid 40-51. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.10.025>
- Kaminsky, J.A., Gaskin, E., Matsuda, M & Miguel, A.H. (2009). In-Cabin Commuter Exposure to Ultrafine Particles on Commuter Roads in and around Hong Kong's Tseung Kwan O Tunnel. *Aerosol and Air Quality Research*, Vol (9), sid 353-357. DOI: 10.4209/aaqr.2008.09.0041

- Knibbs, L.D., Cole-Hunter, T., Morawska, L. (2011). A review of commuter exposure to ultrafine particles and its health effects. *Atmospheric environment*, Vol (45), sid 2611-2622. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.02.065>
- Knibbs, L.D., De Dear, R.J., Morawska, L. (2010). Effect of cabin ventilation rate on ultrafine particle exposure inside automobiles. *Environmental Science & Technology*, Vol (44), 3546-3551. DOI: 10.1021/es9038209.
- Leavet, A., Reed, N., Patel, S., Bradley, K., Kulkarni, P., Biswas, P. (2017). Comparing on-road real-time simultaneous in-cabin and outdoor particulate and gaseous concentrations for a range of ventilation scenarios. *Atmospheric environment*. Vol (166) sid 130-141. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2017.07.016
- Lee, E.S., Stenstrom, M.K., Zhu, Y. (2015). Ultrafine particle infiltration into passenger vehicles. Part I: Experimental evidence. *Transportation Research*, Vol (38), sid 156–165. DOI: 10.1016/j.trd.2015.04.025
- Madl, P., Majid, H., Kwasny, F., Hofmann, W. (2015). In-Vehicle exposure to ultrafine particles while driving through a tunnel system and associated lung deposition calculations. *Aerosol and air quality research*, Vol 15, sid 295-305. DOI: 10.4209/aaqr.2014.01.0013
- Malmqvist, E. och H. Tinnerberg. Dos-responssamband för kortvarig ökning av NO<sub>2</sub>. Lunds universitet. (pdf, 312,5 kB)
- Martin, A.N., Boulter, P.G., Roddis, D., McDonough, L., Patterson, M., Rodriguez del Barco, M., Mattes, A., Knibbs, L.D. (2016). In vehicle nitrogen dioxide concentrations in road tunnels. *Atmospheric Environment*, vol. 144, sid 234-248. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.083>
- Merritt, A.-S. Georgellis, A., Andersson, N. Bedada, G.B, Bellander, T. och Johansson, C. (2019). Personal exposure to black carbon in Stockholm, using different intraurban transport modes. *Science of the Total Environment* 674 (2019) 279–287. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.04.100.
- Muala, A., Bion, A., Bosson, J., Behndig, A., Blomberg, A., Couderc, S., Sandström, T. (2011). Reduction of diesel exhaust-induced health effects by using a vehicle cabin air inlet filter. *European Respiratory Journal*, Vol (38), sid 3316
- Muala, A., Sehlstedt, A., Bion, A., Österlund, C., Bosson, J.A., Behndig, A.F., Bucht, A., Boman, C., Mudway, I.S., Pourazar, J., Langrish, J.P., Couderc, S., Blomberg, A., Sandström, T. (2014). Assessment of the capacity of vehicle cabin air inlet filters to reduce diesel exhaust-induced symptoms in human volunteers. *Environmental Health*, Vol (13)
- Orru, H och Forsberg, B - Assessment of long-term health impacts of air quality with different guideline values for NO<sub>x</sub> in the planned by-pass tunnel Förbifart Stockholm”. Umeå Universitet 3 2016. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:1071180/FULLTEXT01.pdf>.
- Orru, H., B. Lövenheim, C. Johansson och B. Forsberg (2013). Estimated health impacts of changes in air pollution exposure associated with the planned by-pass Förbifart

- Stockholm. Institutet för miljömedicin, Umeå universitet. <http://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:809650/FULLTEXT01.pdf>.
- Orru, H., B. Lövenheim, C. Johansson och B. Forsberg (2015). Potential health impacts of changes in air pollution exposure associated with moving traffic into a road tunnel. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 1–8.
- Raza, T. Bellander, G. Bero-Bedada, M. Dahlquist, J. Hollenberg, M. Jonsson, T. Lind, M. Rosenqvist, L. Svensson, and P. L.S. Ljungman (2014). Short-term effects of air pollution on out-of-hospital cardiac arrest in Stockholm. *European Heart Journal* vol. 35, s. 861-867.
- Silvergren, S. Sjövall, B. och Johansson, C. Koldioxidhalter relaterade till fordon. SLB rapport 7:2013. [http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb2013\\_007.pdf](http://slb.nu/slb/rapporter/pdf8/slb2013_007.pdf).
- Sandström, T., Forsberg, B., Bylin, G. (2003). *Air quality in road tunnels health effects of nitrogen dioxide and aspects on co-pollutants*. Borlänge: Vägverket (publication 2003:64)
- Young, M., Jansen, K., Gould, T., Sack, C., Hooper, L., Stewert, J., Larson, T., Vedal, S., Kaufman, J. The effect of complex traffic-related mixtures on blood pressure: interaction between particles and gases in a trial of vehicle filtration. (2019). *Environmental epidemiology*, Vol (3), sid 458. DOI: 10.1097/01.EE9.0000611172.95226.b6
- Yu, N., Shu, S., Lin, Y., She, J., Ip, H.S.S., Qiu, X., Zhu, Y. (2017) High efficiency cabin air filter in vehicles reduces drivers' roadway particulate matter exposure and associated lipid peroxidation. *PLoS ONE*, Vol (11). DOI: 10.1371/journal.pone.0188498
- Zhu, Y., Fung, D., Kennedy, N., Hinds, W., Eiguren-Fernandez A. (2008) Measurements of ultrafine particles and other vehicular pollutants inside a mobile exposure system on Los Angeles freeways. *Journal of the Air & Waste Management Association*. Vol (58), sid 424-34. DOI: <https://doi.org/10.3155/1047-3289.58.3.424>

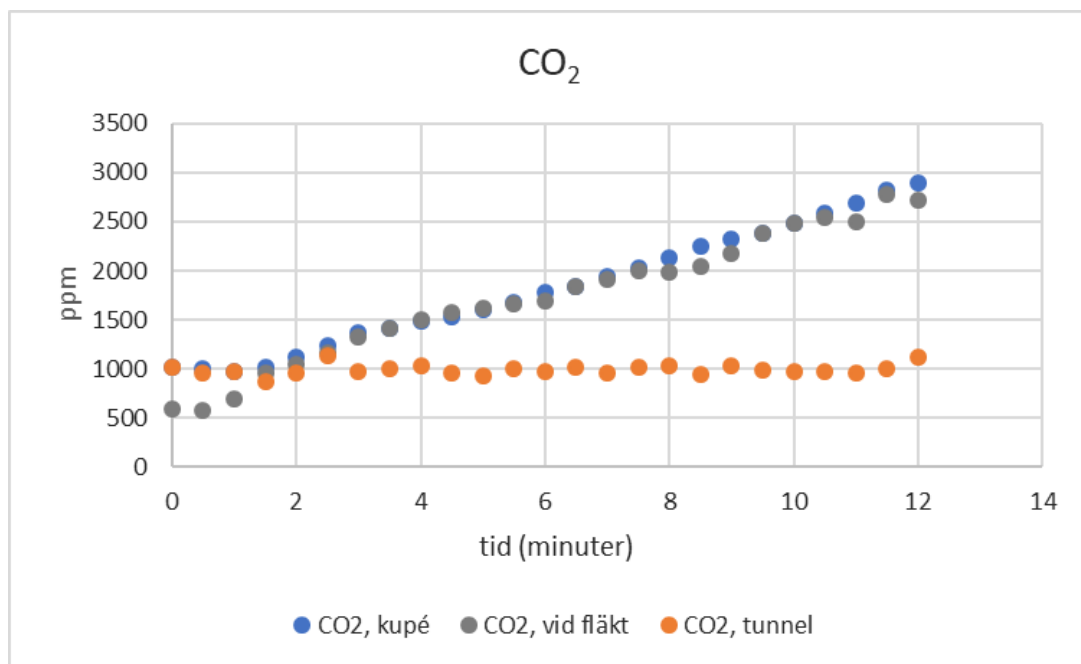
## Appendix

### Halter i kupén med recirkulation aktiverat

Recirkulation aktiverades under ca 15 minuter för varje testbil. Färden med recirkulation var till störst del på öppen väg. Variationen av CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> efter att recirkulation aktiverats och sot var liknande mellan de olika testbilarna, därav redovisas endast figurer för testbilen Subaru Forester. De skillnader som fanns mellan testbilarna bedöms främst beror på variationer i bilarnas täthet.

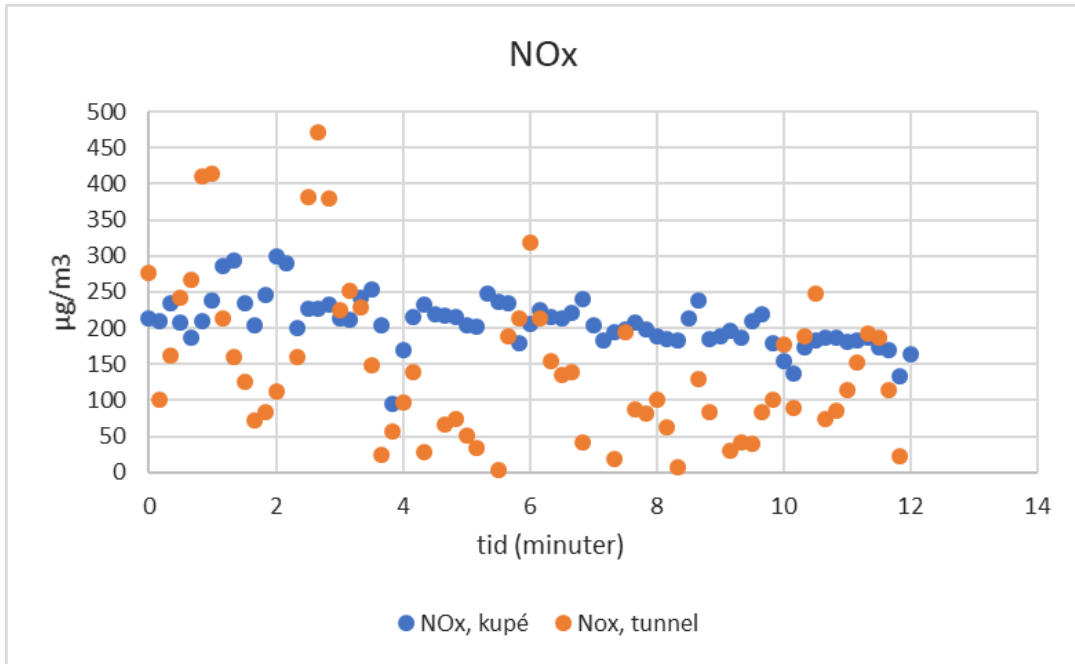
Variationen av CO<sub>2</sub> vid fläkten övergår till att variera mycket likt CO<sub>2</sub>-halten i kupén efter att recirkulation slagits på, se Figur 18. Halten i kupén ökar eftersom utandningsluften från passagerarna inte blandas ut med ventilationsluft utifrån.

Halten av NO<sub>x</sub> påverkas i lägre utsträckning av variationen av halten i utomhusluften efter att recirkulationen aktiverats, se Figur 19. Sothalten i kupén påverkas i än mindre utsträckning av variationer i utomhushalten när recirkulation är aktiverat, se Figur 20. Sot- och NO<sub>x</sub>-halten i kupén minskar något under tiden då recirkulation är aktiverat. Detta bedöms vara för att bilen inte är helt tät. Sot deponeras också inne i bilen, därav minskar sothalten något snabbare än NO<sub>x</sub>-halten när recirkulation är aktiverat.

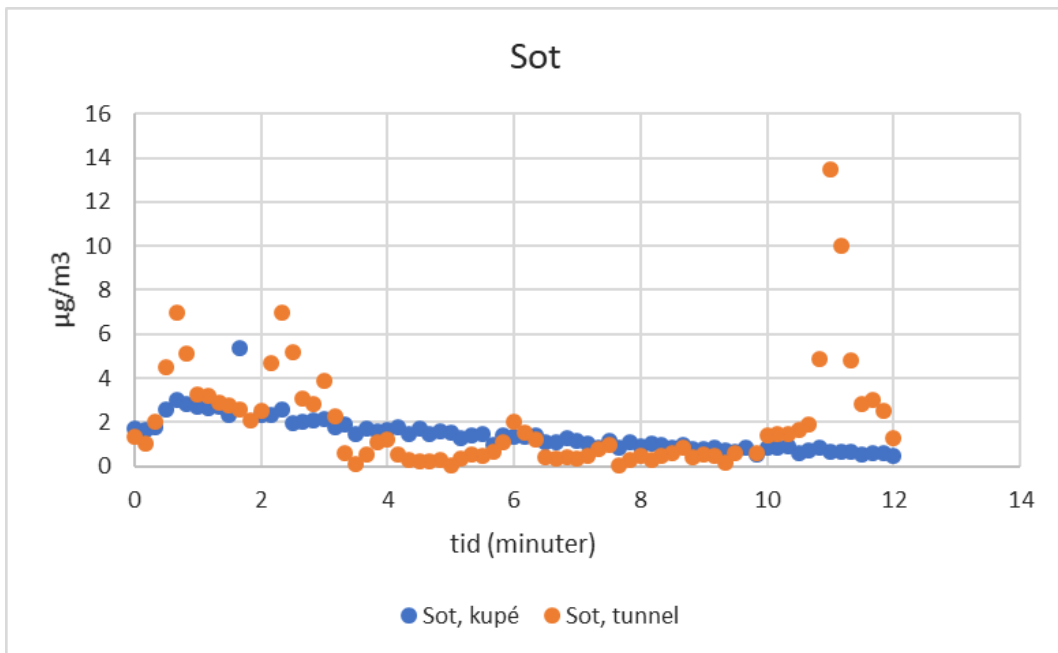


**Figur 18.** Koldioxidhalter i kupén och i omgivningsluften för testbilen av märke Subaru Forester efter att recirkulation aktiverats.





**Figur 19.** Kväveoxidhalter i kupén och i omgivningsluften för testbilen av märke Subaru Forester efter att recirkulation aktiverats



**Figur 20.** Sothalter i kupén och i omgivningsluften för testbilen av märke Subaru Forester efter att recirkulation aktiverats.

**SLB-analys**, Miljöförvaltningen i Stockholm.  
Tekniska nämndhuset, Fleminggatan 4.  
Box 8136, 104 20 Stockholm.  
[www.slb.nu](http://www.slb.nu)

