Nr B 2443
Maj 2022

Emissionsmätningar från bussar

Euroklass VI-gasbussar och bränsledrivna värmare i elbussar

Åsa Hallquist och Håkan Salberg

SVENSKA MILJÖINSTITUTET

I samarbete med Västtrafik

Författare: Åsa Hallquist och Håkan Salberg
Medel från: Västtrafik och Stiftelsen IVL
Rapportnummer B 2443
ISBN 978-91-7883-376-4
Upplaga Finns endast som PDF-fil för egen utskrift

© IVL Svenska Miljöinstitutet 2022
IVL Svenska Miljöinstitutet AB, Box 210 60, 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se

Rapporten har granskats och godkänts i enlighet med IVL:s ledningssystem

Förord

Föreliggande studie har genomförts av IVL Svenska Miljöinstitutet. Projektgruppen har bestått av Åsa Hallquist (IVL) och Håkan Salberg (IVL). Projektet finansierades med medel från Västtrafik och Stiftelsen IVL.

Vi som har arbetat med studien vill särskilt tacka alla förare och all övrig personal vid mätplatserna för deras hjälp och gästfrihet.

Innehållsförteckning

Sammanfattning 5

Summary 6

Bakgrund 7

Mätningar 8

Biogasbussar, Euroklass VI 8
Bränsledrivna värmare i elbussar 9

Resultat 11

Emissioner från gasbussar 11

Emissioner från bussvärmare 15

Slutsatser 20

Referenser 21

Sammanfattning

Inom ramen för ett forskningsprojekt, samfinansierat av Västtrafik och Stiftelsen IVL, har emissionerna från individuella Euroklass VI-gasbussar samt bränsledrivna värmare i elbussar karakteriserats, totalt 37 st. (20 gasbussar och 17 värmare). En extraktiv mätmetod har använts där omgivningsluften kontinuerligt provtas och koncentrationerna av både gaser och partiklar mäts med hög tidsupplösning (≥1 Hz). Emissionsfaktorer (EF) beräknas genom att använda kolbalansmetoden, där fullständig förbränning och en viss kolfraktion i bränslet antas. Resultaten rapporteras som föroreningarnas massa (alt. antal) per kilo förbrukat bränsle.

Mätningarna utfördes på bussdepåområdena och de avgasrelaterade mätningarna gjordes under fullgasacceleration från stillastående. Minst tre godkända mätningar per buss gjordes. Medel-EF beräknades för varje buss tillsammans med dess 95%-iga konfidensintervall. För karakterisering av emissionerna från bussvärmare användes en liknande mätmetod. Bussen var dock i detta fall stillastående och växelvisa mätningar av bussvärmsplymen och bakgrunden gjordes. Värmarna startades manuellt och testerna av en värmare inkluderade minst två cykler av värmare på och av.

Medianemissionerna både gällande partikelmassa (PM), partikelantal (PN) och kväveoxider (NOx) var lägre för de testade Euroklass VI-gasbussarna jämfört med tidigare karakteriserade Euroklass V/EEV-gasbussar. Däremot var kolväte (HC)-emissionerna relativt oförändrade i jämförelse med de yngre (årsmodell >2011) Euroklass V-gasbussarna.

Inom projektet har mätmetoden vidareutvecklats till att också inkludera mätning av metan, då metan är en effektiv växthusgas. Emissionerna av metan från de analyserade Euroklass VI-gasbussarna var inom intervallet 0,04–1,9 g kg bränsle^{-1}.

Totalt karakteriserades 17 HVO-drivna värmare och medianemissionerna gällande partiklar (EF_{PM} och $EF_{PN>23nm}$) var relativt lika för de testade värmarna i jämförelse med avgasrelaterade emissioner från tidigare testade Euroklass VI-bussar med HVO som bränsle (2,5 vs 3,0 g kg bränsle^{-1} och 4,1 vs $5{,}4\times10^{12}$ g kg bränsle^{-1}). Dock kan emissionerna av små partiklar, partikeldiameter <23 nm, vara högre från bussvärmare jämfört med de avgasrelaterade emissionerna från Euroklass VI-HVO-bussar.

Medianemissionerna för NOx var lägre för de analyserade värmarna jämfört med tidigare testade Euroklass VI-HVO-bussar (1,8 vs 6,0 g kg bränsle^{-1}). Likaså var variationen av NOx-utsläppen från värmarna mindre jämfört med partikelemissionerna. Emissionerna av NOx för de individuella värmarna låg inom spannet 1,2–2,8 g kg bränsle^{-1}.

Höga emissioner, främst gällande partiklar och kolväten (HC), kunde observeras från bussvärmarna vid start eller avstängning av värmaren. Detta är något som skulle behöva studeras mer ingående i framtida studier.

Summary

Within the frame work of a research project funded by Västtrafik and the foundation SIVL, the emissions from individual Euro class VI gas buses and fuel-operated heaters in electric buses have been characterised, in total 37 buses (20 gas buses and 17 heaters). An extractive measurement method has been used where the ambient air is continuously measured, and particle and gaseous concentrations are measured with high time resolution (≥1 Hz). Emission factors (EFs) were retrieved using the carbon balance method, assuming complete combustion and a specific fuel carbon content. The results are reported as mass or number of pollutants per kilo fuel burnt.

The measurements were conducted at the bus depot areas during full throttle accelerations from stand-still. A minimum of three successful measurements per vehicle were conducted, often more. For each individual bus, average EFs were calculated together with the statistical 95% confidence interval. A similar measurement method was used for emission characterisation from the fuel-operated heaters, but here the bus was not moving and alternately measurements of the heater plume and the background was conducted. The heaters were turned on manually and a test included measurements of at least two cycles of heater turned on and off.

The median emissions regarding particle mass (PM), particle number (PN) and nitrogen oxides (NOx) were lower for the tested Euro class VI gas buses compared to previously characterised Euro class V/EEV gas buses. The emissions of hydrocarbons (HC) were on the other hand relatively similar to the younger Euro class V/EEV gas buses (model year >2011).

Within the project, the measurement method has been further developed to also include measurements of methane, as methane is an efficient greenhouse gas. The methane emissions of the tested heaters ranged between 0.04–1.9 g kg fuel^{-1}.

In total, 17 HVO-fuelled heaters were characterised and the median emissions regarding particles (EF_{PM} and $EF_{PN>23nm}$) were relatively similar to the exhaust-related emissions from previously tested Euro class VI buses running on HVO (2.5 vs 3.0 g kg fuel^{-1} and 4.1×10^{12} vs 5.4×10^{12} g kg fuel^{-1}). However, the emissions of smaller particles, particle diameter < 23 nm, can be higher from heaters compare to the emissions from Euro class VI-HVO buses.

The median emissions regarding NOx were lower for the tested heaters compared to Euro class VI-HVO buses (1.8 vs 6.0 g kg fuel^{-1}). Also, the variation in the NOx emissions were lower compared the particle emissions. The NOx emissions of the individual heaters ranged between 1.2–2.8 g kg fuel^{-1}

Emission peaks, especially regarding particles and HC, could be observed when turning the heater on and off. This is something that should be analysed more in depth in future studies.

Bakgrund

Det är väl känt att förbränningsprocesser, speciellt trafikrelaterade emissioner, starkt bidrar till de totala halterna av partiklar och gasformiga luftföroreningar i urbana miljöer (Querol et al., 2004). Många epidemiologiska studier har visat att partiklar har negativ hälsopåverkan och i Sverige tros partiklar stå för minst 3 700 dödsfall per år (Gustafsson et al., 2018), men det är fortfarande oklart vilka egenskaper som bestämmer den negativa hälsopåverkan, är det t.ex. antal, storlek, form, massa eller kemisk sammansättning. Idag överskrids miljökvalitetsnormen för partiklar (PM_{10}) i många europeiska städer. I Sverige bidrar de tunga fordonen, d.v.s. lastbilar och bussar, till 37 % (år 2019) av de avgasrelaterade utsläppen av partiklar ($PM_{2.5}$). Detta trots att den tunga trafiken bara svarar för knappt en tiondel av det totala vägtrafikarbetet i Sverige. Lastbilar och bussar bidrar också till en stor del av utsläppen av kväveoxider (NO_X). Exempelvis bidrog år 2019 de tunga fordonen till drygt 50 % av vägtrafikens totala utsläpp av NO_X i Sverige (Naturvårdsverket/SMED).

För att kunna möta utmaningarna med ökade transporter, minskade oljeresurser och kunna minska emissioner av växthusgaser har EU beslutat om en 10-procentig övergång från konventionella bränslen (bensin och diesel) till alternativa bränslen inom vägtransportsektorn till år 2020 (Directive 2009/28/EC). Det är därför viktigt att förbränningsemissioner från alternativa bränslen studeras ingående för att inte riskera ökade utsläpp av luftföroreningar som kan ha negativa hälso- eller miljöeffekter eller andra än så länge okända effekter, alternativt att fastställa hälsomässiga fördelar med att använda dessa bränslen.

Metan är 25 gånger mer effektiv växthusgas i jämförelse med CO_2, gällande uppvärmnings-potentialen (GWP). Då biogas till största delen består av metan är det således viktigt att studera förekomst av eventuellt så kallat metanslip, d.v.s. metan som går oförbränt genom förbränningsprocessen.

Elektrifiering är ett annat alternativ för att uppnå klimatneutralitet. Elbussar som enbart nyttjar el för fordonets framdrift, och som kör i regioner med kalla vintrar, klarar oftast inte av att värma upp luften i bussen utan att använda en bränsledriven värmare. Information kring utsläppen av dessa värmare är bristfällig.

IVL har tillsammans med Västtrafik utvecklat en metod med vilken avgasrelaterade emissionsfaktorer (EF) för individuella fordon i verklig trafik kan mätas från vägkanten (Hallquist et al., 2013, Watne et al., 2018, Liu et al., 2019, Le Breton et al., 2019, Zhou et al., 2020 och Zhou et al., 2021). Det är en extraktiv provtagningsmetod där omgivningsluften kontinuerligt provtas och koncentrationerna mäts med hög tidsupplösning (≥1 Hz). Emissionsfaktorer för partiklar och gaser bestäms genom att simultant mäta CO_2- och partikel/gas-koncentrationen från samma volym i avgasplymen och jämföra med koncentrationerna innan passagen. Bränslespecifika EF i gram (eller antal) per kg förbrukat bränsle kan beräknas genom att anta fullständig förbränning och en uppskattning av kolinnehållet i bränslet.

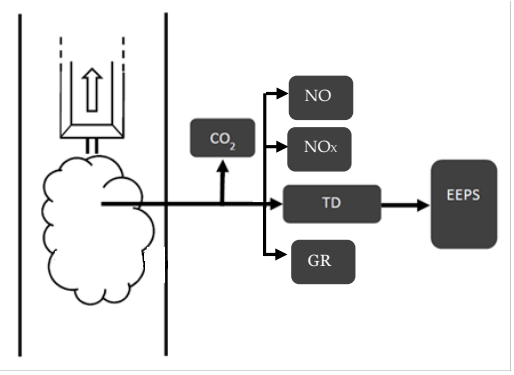
I detta projekt har denna metod vidareutvecklats genom att inkludera mätning och bestämning av emissionerna av metan under verklig körning samt för att möjliggöra karakterisering av utsläpp från bränsledrivna värmare i elbussar vid verklig utspädning.

Mätningar

I detta projekt har emissioner från bränsledrivna värmare i elbussar och från biogasbussar Euroklass VI studerats, både med avseende på partiklar och gaser. Mätningarna gjordes vid bussdepåerna och sammanlagt har 37 bussar studerats (20 gasbussar och 17 värmare).

Biogasbussar, Euroklass VI

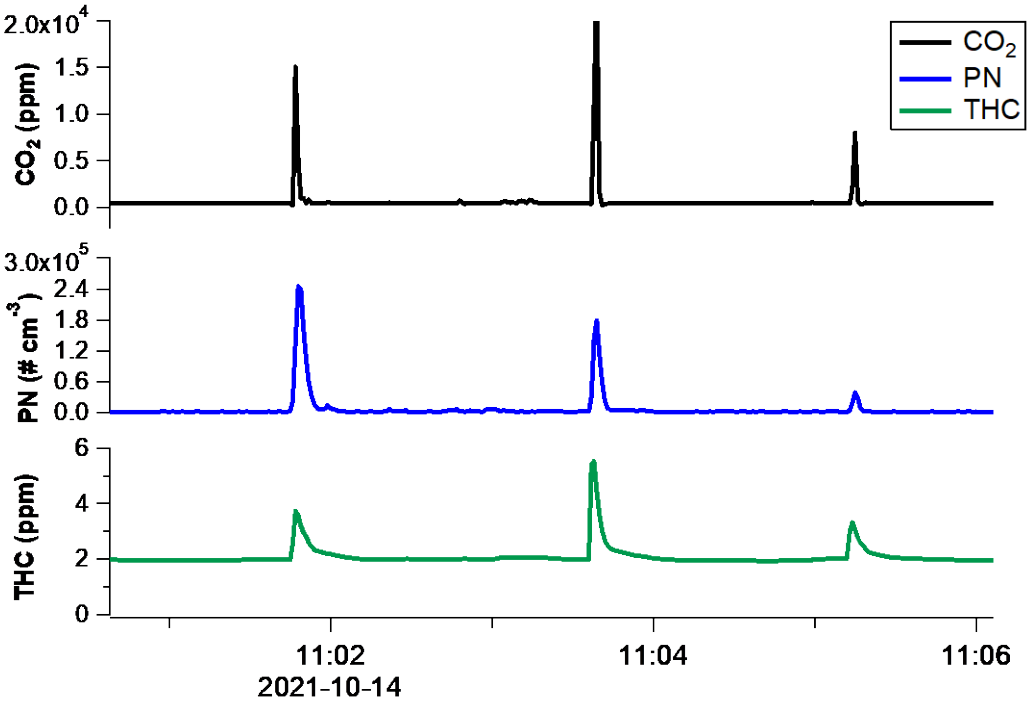
För att karakterisera de avgasrelaterade emissionerna från biogasbussar så användes vår plymmätningsmetod som vi har utvecklat i samarbete med Västtrafik med vilken avgasrelaterade emissionsfaktorer (EF) för individuella fordon i verklig trafik kan bestämmas (Hallquist et al., 2013, Watne et al., 2018, Liu et al., 2019, Le Breton et al., 2019, Zhou et al., 2020, Zhou et al., 2021 och Jerksjö och Hallquist, 2016). Det är en extraktiv provtagningsmetod där omgivningsluften kontinuerligt provtas och koncentrationerna mäts med hög tidsupplösning (≥1 Hz). Provtagningsinsläppet är placerad i nära anslutning till avgasrörens placering (Fig. 1). I Figur 1 anges de instrument som användes för att mäta partiklar, kväveoxider (NOx), CO_2, metan (CH_4) och kolväten (HC). Partikelinstrumentet (EEPS) mäter partikelantalsstorleksfördelningar (PNSD) i intervallet 5,6–560 nm med en tidsupplösning av 1 Hz. Partikelmassan beräknas sedan genom att anta sfäriska partiklar med densiteten 1 g cm^{-3}.



Instrument	Parameter
EEPS, Engine Exhaust Particle Sizer	Partikelantalsstorleks-fördelning 5,6-560 nm
LI-840A	CO_2
GRAPHITE 52M-D	THC, CH_4
Thermo Scientific™, Model 42i	NOx
Thermo Scientific™, Model 42i	NO

Figur 1. *Schematisk bild av mätuppställningen och till höger listas de instrument som användes vid mätningarna och vilka parametrar som mättes. TD (Thermodenuder), ett instrument som minimerar påverkan av omgivningstemperaturen vid partikelmätningarna.*

För att förhindra påverkan av omgivningstemperaturen på partikelmätningarna så användes en thermodenuder (TD) som värmer provpartikelflödet till 25 °C. Kolväten (HC) och metan mättes med instrumentet GRAPHITE 52M-D med tidsupplösningen 1 s och där provflödet värmdes till 180 °C. Icke-metankolväten (NMHC) fås sedan genom att subtrahera CH_4-koncentrationen från THC-koncentrationen. För att kunna mäta NOx-koncentrationer, inklusive fördelningen mellan NO och NO_2, så användes två kemiluminiscens-instrument, där ett mäter NO och det andra NOx med tidsupplösningen 1 s. Även CO_2 mättes vilket möjliggör beräkning av EF i per kg förbrukat bränsle. Figur 2 visar ett exempel på hur emissionssignalerna kan se ut.



Figur 2. *Exempel på uppmätta emissionssignaler. Varje topp är en busspassage. Svart linje CO_2 (ppm), blå linje partikelantal (# cm^{-3}) och grön linje kolväten (ppm, metanekvivalenter).*

Varje koncentrationstopp är en busspassage. Emissionsfaktorer kan beräknas genom att relatera den integrerade och bakgrundskorrigerade partikel- eller gaskoncentrationen ($\int_0^t (i(t) - \overline{i_{bkg}})dt$) med den integrerade och bakgrundskorrigerade CO_2-koncentratonen ($\int_0^t (CO_2(t) - \overline{CO_{2_{bkg}}})dt$) samt att anta fullständig förbränning och veta kolfraktionen i bränslet (Hallquist et al., 2013) (Ekvation 1).

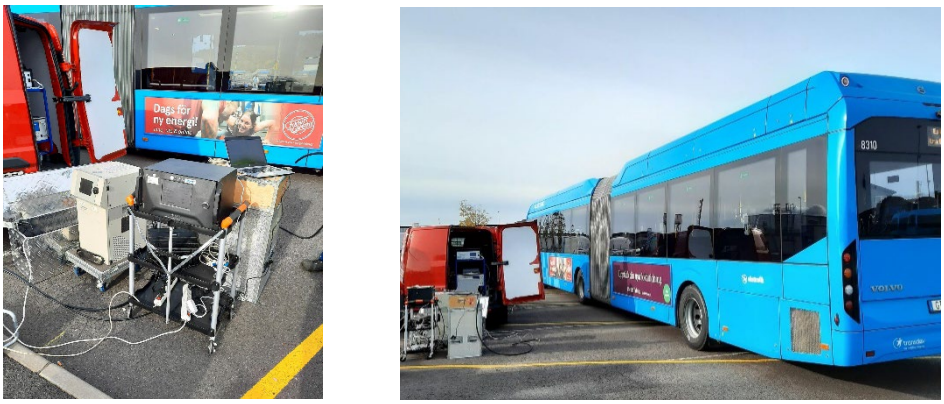
$$EF_i = \frac{\int_0^t (i(t) - \overline{i_{bkg}})dt}{\int_0^t (CO_2(t) - \overline{CO_{2_{bkg}}})dt} \times EF_{CO_2} \qquad \text{Ekvation 1}$$

Mätningarna gjordes under fullgasacceleration från stillastående och data från minst tre accelerationer från samma fordon insamlades. Innan mätningarna så körde bussen en sträcka i verklig trafik för att förhindra karakterisering av kalla motorer. Emissionsfaktorerna beräknades som ett medelvärde med tillhörande 95%-igt konfidensintervall för varje bussindivid och ämne/specie. Dessa EF:er jämfördes sedan med tidigare uppmätta emissioner med samma metod.

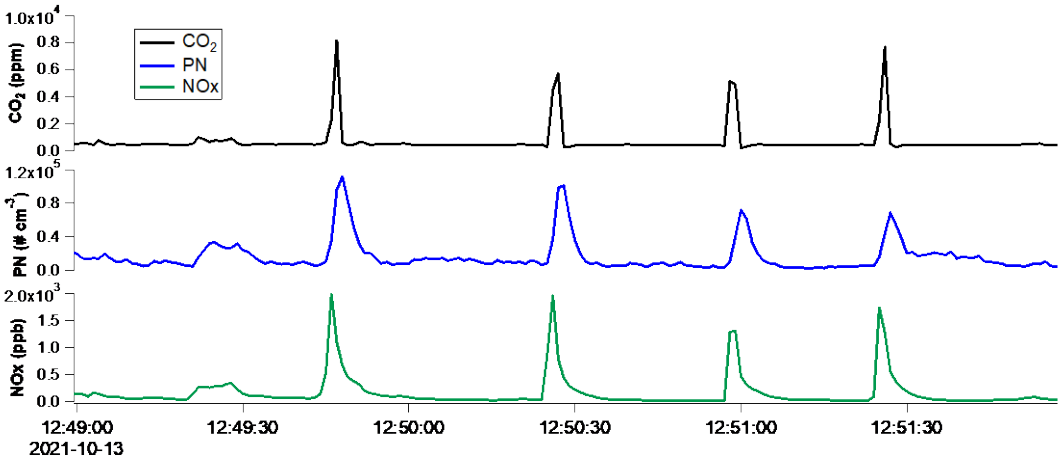
Bränsledrivna värmare i elbussar

Totalt testades 17 bränsledrivna värmare i elbussar, 9 av Värmartyp 1 (Spheros 230) och 8 av Värmartyp 2 (Valeo Thermo S230) och båda värmarna använde HVO som bränsle.

Likt de avgasrelaterade mätningarna så användes en extraktiv provtagningsmetod för karakteriseringen av emissioner från de bränsledrivna värmarna. Skillnaden var att bussen nu stod stilla och vi mätte växelvis i avgasplymen och i bakgrunden (se Figur 3 & 4). Varje koncentrationstopp i Figur 4 är således en bussvärmarplym. Emissionsfaktorer kan sedan beräknas på samma sätt som för de avgasrelaterade emissionerna (se Ekvation 1).



Figur 3. *Exempelbilder på del av mätuppställnigen vid mätningar av emissioner från bussvärmare*



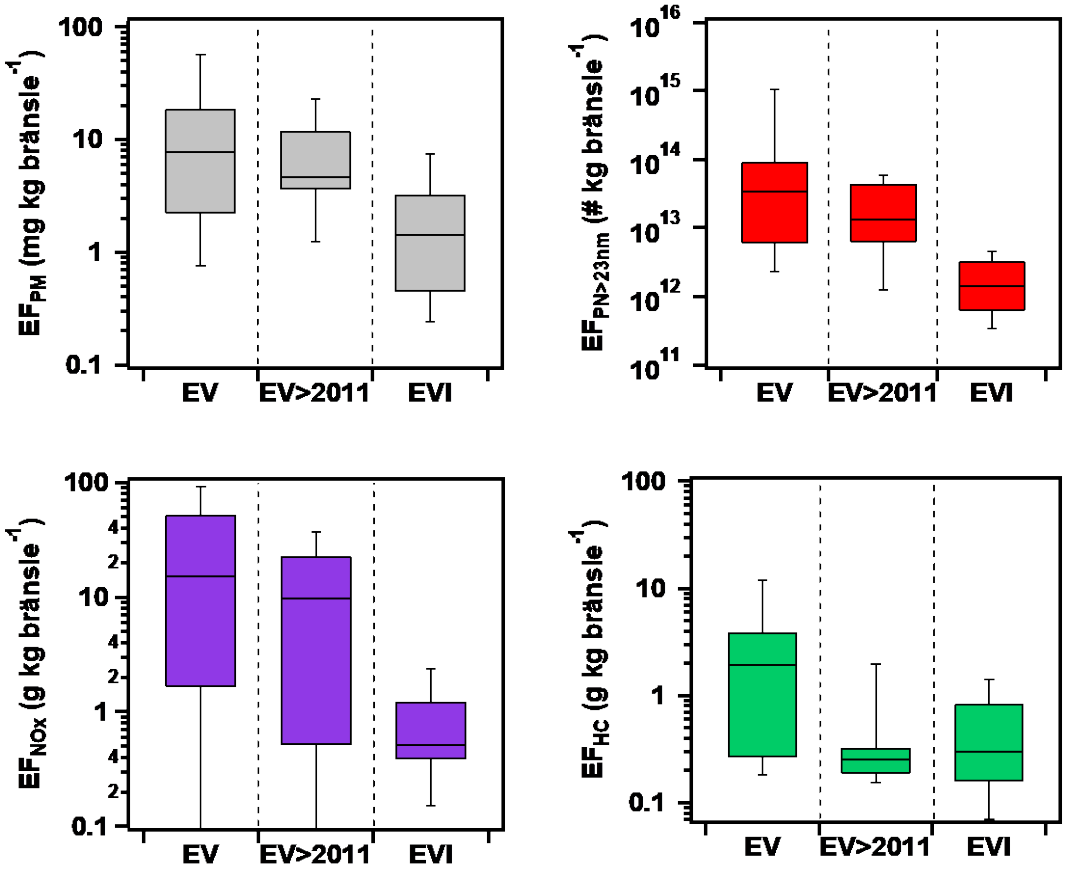
Figur 4. *Exempel på emissionssignaler som erhölls vid mätningar av bussvärmare. Varje koncentrationstopp är en mätning av emissionerna från bussvärmaren. Svart linje CO_2 (ppm), blå linje partikelantal (# cm^{-3}) och grön linje NOx (ppb).*

Bussvärmarna startades manuellt, dock stängdes värmaren av automatiskt då rätt temperatur hade nåtts, således varierade den möjliga mättiden. Bussen behövde sedan kylas ner innan det var möjligt att starta värmaren igen. För att hålla temperaturen nere i bussen så utfördes testerna med alla dörrar öppna. Testerna av en värmare inkluderade minst två cykler av värmare på och av och alla värmare hade också startats och provkörts innan testerna startade. Ofta erhölls högre emissioner vid uppstart och avstängning av värmarna, vilket stämmer överens med vad som observerats i tidigare studier (Votjek-Loom et al., 2015 och Danish Technological Institute, 2021), så enbart datapunkter under den stabila fasen användes för beräkningen av medelemissionerna för de olika värmarna.

Resultat

Emissioner från gasbussar

Medianemissionerna, både gällande PM, PN och NOx, är lägre för Euroklass VI-gasbussar jämfört med Euroklass V-gasbussar (Fig. 5). Detta gäller även om man bara jämför med nyare Euroklass V-bussar, dvs inkluderar bara de som är yngre än 2011. Däremot är HC emissionerna från Euroklass VI-gasbussar relativt oförändrade i jämförelse med de yngre Euroklass V-gasbussarna (medianemissionerna 0,30 respektive 0,25 g kg bränsle^{-1}). Datat som presenteras i Figur 5 inkluderar samtliga Euroklass VI-gasbussar som har analyserats i denna studie (20 st.) samt 6 bussar som har analyserats sedan tidigare.



Figur 5. *Låddiagram över EF_{PM} (a), $EF_{PN>23\ nm}$ (b), EF_{NOx} (c) och EF_{HC} (d) för gasbussar med avseende på Euroklass (Euroklass V (EV) och Euroklass VI (EVI)). Övre delen av lådan representerar 75e percentilen, den nedre 25e percentilen och felstaplarna representerar 90e respektive 10e percentilen. Lodrätta strecket i lådan är medianen.*

En möjlig orsak till de lägre emissionerna är att Euroklass VI-gasbussar arbetar vid stökiometriska förbränningsförhållanden, dvs där förhållandet mellan luft och bränsle (lambda) är så att luftens syre exakt räcker till för att bränslet skall förbrännas fullständigt (benämns även lambda 1 (λ=1)), och är utrustade med trevägskatalysatorer (TWC). För Euroklass V-gasbussar är det vanligare med mager förbränning (”lean burn”), vilket är en förbränning med ett stort luftöverskott, ofta benämnt som ett luft-bränsleförhållande över 1 (λ>1), vilket inte möjliggör användandet av en TWC (Posada 2009, Lou et al., 2020).

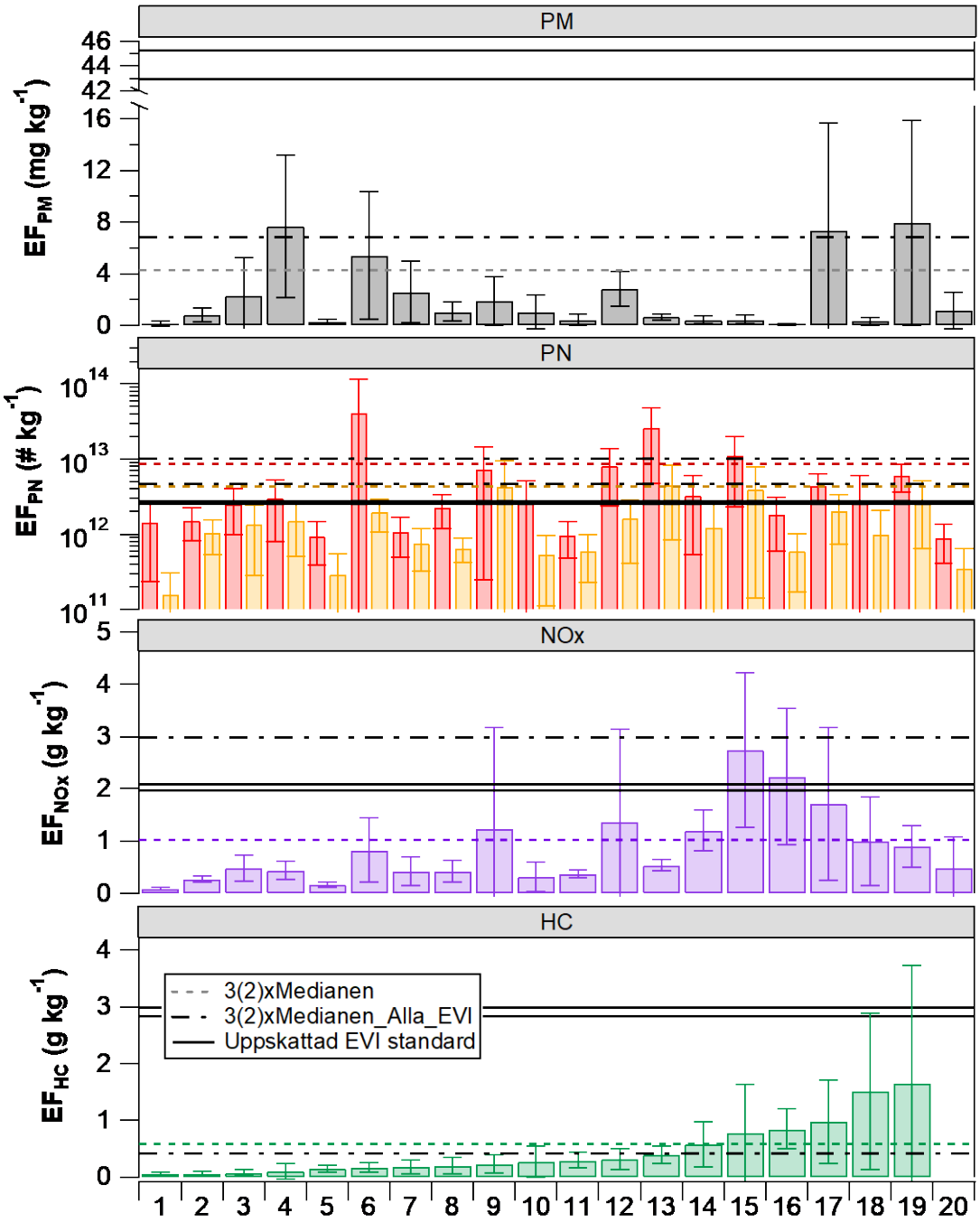
Utsläppskraven för tunga fordon anges i massa per kWh. För att kunna omvandla dessa till per kg förbränt bränsle antas en bränsleförbrukning på 221–233 g kWh^{-1} för gasbussar och 212 g kWh^{-1} för dieselbussar (Kies 2017). I Tabell 1 är lagkravet för Euroklass VI för tunga fordon för HC, CH_4, NOx, PM och PN listade samt de omräknade värdena i per kg förbrukat bränsle.

Tabell 1 ***Utsläppslagkravet för Euroklass VI, tunga fordon, för kolväten (HC), metan (CH_4), kväveoxider (NOx), partikelmassa (PM) och partikelantal (PN) samt omräknat till per kg förbrukat bränsle[a].***

Emissionsstandard	HC	CH_4	NOx	PM	PN
EVI, WHSC[b] *g kWh^{-1}*	0,13		0,4	0,01	$8{,}0 \times 10^{11}$
Uppskattat lagkrav utryckt i *g kg bränsle^{-1}*	0,56–0,59 (0,61)[d]		1,72–1,81 (1,89)	0,04–0,05 (0,05)	$3{,}4 \times 10^{12}$ - $3{,}6 \times 10^{12}$ ($3{,}8 \times 10^{12}$)
EVI, WHTC[c] *g kWh^{-1}*	0,16 0,16[e]	0,5	0,46	0,01	$6{,}0 \times 10^{11}$
Uppskattat lagkrav utryckt i *g kg bränsle^{-1}*	0,69–0,72 (0,75)	2,1–2,3	1,97–2,1 (2,2)	0,04–0,05 (0,05)	$2{,}6 \times 10^{12}$ - $2{,}7 \times 10^{12}$ ($2{,}8 \times 10^{12}$)

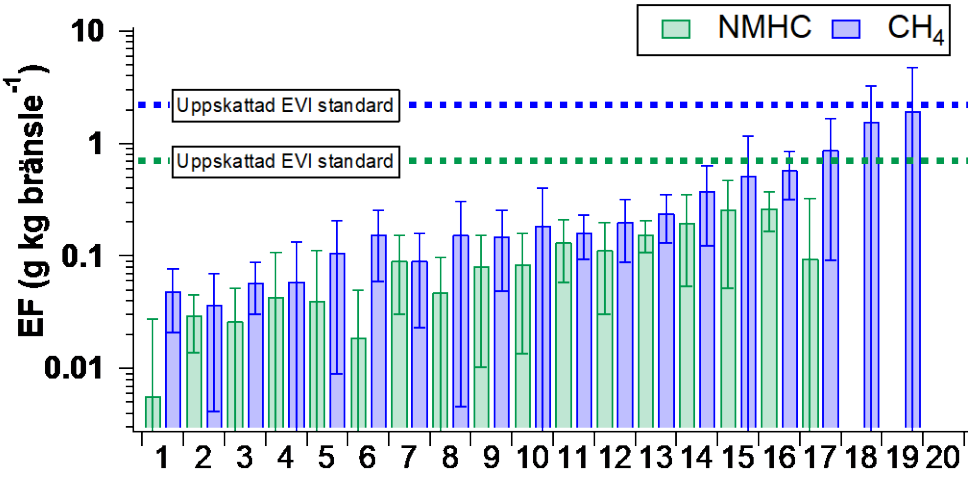
[a] *Antar en bränsleförbrukning på 221–233 (gasbussar) och 212 (dieselbussar) g kWh^{-1}*
[b] *WHSC= "world harmonised stationary cycle" för dieselmotorer*
[c] *WHTC = "world harmonised transient testing" för diesel- och ottomotorer*
[d] *värden inom parantes-dieselmotorer, utan parantes-ottomotorer*
[e] *för gasbussar är detta NMHC ("non-methane hydrocarbons": icke-metankolväten)*

Medianemissionerna för samtliga ämnen ligger lägre än det uppskattade lagkravet för Euroklass VI-gasbussarna: NOx: 0,51 g kg $bränsle^{-1}$, THC: 0,30 g kg $bränsle^{-1}$, PM: 1,4 mg kg $bränsle^{-1}$, PN> 23 nm $1{,}4 \times 10^{12}$ # kg $bränsle^{-1}$. Viktigt att poängtera är dock att utsläppskraven bygger på körcykler och mätningarna i den presenterade studien är punktmätningar, så jämförelser med lagkravet är enbart indikativa. I Figur 6 syns medelemissionerna för de testade gasbussarna på individbasis. I figuren har också de värden som använts för att bestämma om en bussindivid emitterar statistiskt mycket högre än liknande fordon med samma Euroklass och bränsletillhörighet enligt Jerksjö et al., 2017 lagts in tillsammans med det uppskattade lagkravet. Här har en jämförelse även gjorts med alla tidigare testade Euroklass VI-bussar (punktstreckad linje i figurerna) då dataunderlaget för Euroklass VI-gasbussar än så länge är något begränsat. Ingen av de testade bussarna hade signifikant högre utsläpp än en genomsnittlig buss (medianvärdet multiplicerat med tre (^{3Md}EF) för partiklar och multiplicerat med två för gaser (^{2Md}EF)) med samma Euroklass (punktstreckad) och bränsle (streckad) för PM och PN. För PM är emissionerna klart lägre än det uppskattade lagkravet. För PN ligger dock det uppskattade lagkravet lägre än den övre gränsen för vad en genomsnittlig buss emitterar. Lagkravet innefattar dock enbart icke-flyktiga partiklar med en storlek >23 nm, i dessa mätningar inkluderas även eventuella flyktiga partiklar vilket kan vara en möjlig förklaring. För NOx var det en bussindivid som emitterade högre än en genomsnittlig Euroklass VI-gasbuss (^{2Md}EF), dock var emissionerna lägre i jämförelse med alla Euroklass VI-bussar samt med det uppskattade lagkravet. Även för HC var medelemissionerna tillsammans med det 95%-iga konfidensintervallet lägre än för en genomsnittlig Euroklass VI-gasbuss, vilket också var lägre än det uppskattade lagkravet (här beräknat som summationen av lagkraven för CH_4 och NMHC). Dock var medelemissionerna för två individer klart högre, ungefär en faktor tre högre, än för en genomsnittlig Euroklass VI-gasbuss, dock var variationen mycket stor för dessa individer.



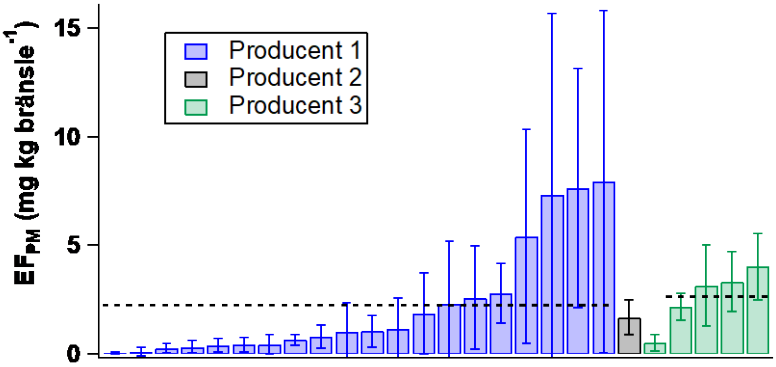
Figur 6. *Medelemissionerna från de testade Euroklass VI-gasbussarna, på individbasis. Gröna staplar-kolväten, lila staplar- NOx, röda staplar-PN, orangea staplar-PN>23 nm, grå staplar-PM. Felstaplarna är det 95%-iga konfidensintervallet. Solida linjer är uppskattat lagkrav uttryckt i per kg bränsle, streckad linje medianen av medelemissionerna för alla tidigare testade Euroklass VI-gasbussar (26 st.) multiplicerat med tre för partikelemissioner (^{3Md}EF) eller medianen multiplicerat med två för gasemissioner (^{2Md}EF), punktstreckad linje är ^{3Md}EF alternativt ^{2Md}EF av medelemissionerna för alla tidigare testade Euroklass VI-bussar (94 st.).*

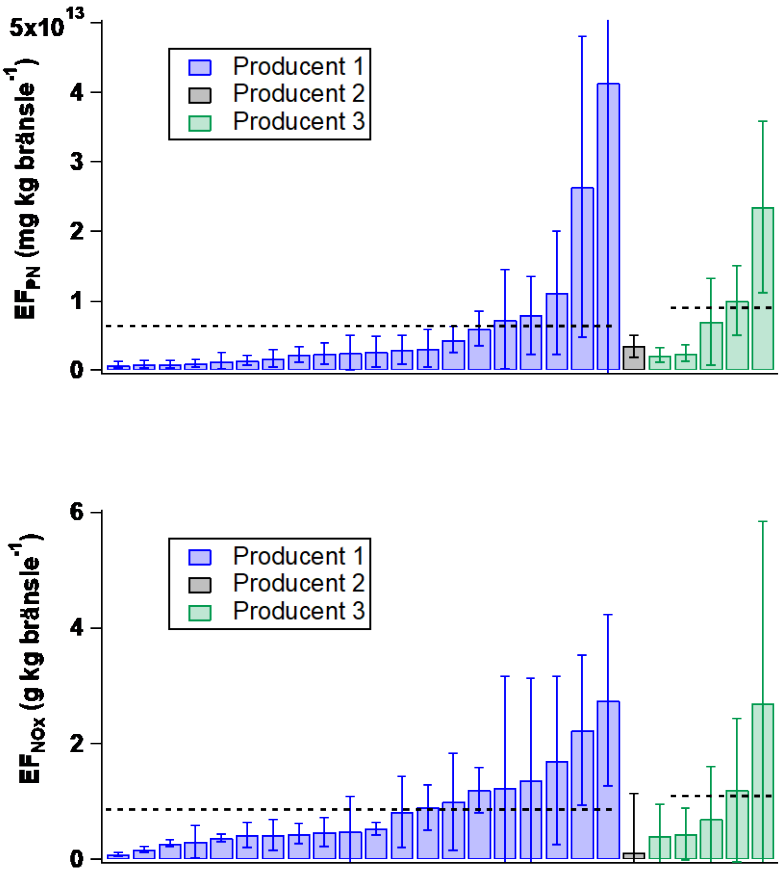
I Figur 7 kan vi se att emissionerna av både NMHC och CH_4 ligger lägre än det uppskattade utsläppslagkravet, även om medelmetanemissionerna för två av bussarna är mycket högre än övriga och ligger nära det uppskattade utsläppslagkravet, dock är variationen stor för dessa individer som tidigare nämnts. Medelmetanemissionerna för de testade Euroklass VI-gasbussar ligger inom intervallet 0,04–1,9 g kg bränsle^{-1} och medianen är 0,16 g kg bränsle^{-1}.



Figur 7. *Medelemissionerna av NMHC (gröna staplar) och CH_4 (blå staplar) från de studerade biogasbussarna (Euroklass VI). Felstaplarna är det 95%-iga konfidensintervallet. Streckade linjer är uppskattat lagkrav uttryckt i per kg bränsle.*

Emissionerna har även analyserats med avseende på fordonstillverkare och som illustreras i Figur 8 så är medelemissionerna relativt lika både avseende partiklar och NOx. Viktigt dock att understryka att det än så länge är ett begränsat dataunderlag.





Figur 8. *EF_{PM} (a), EF_{PN} (b) och EF_{NOx} (c) för Euroklass VI gasbussar med avseende på producent. Felstaplar anger det 95%-iga konfidensintervallet. Streckade linjer är medelvärdet för Producent 1 och 3.*

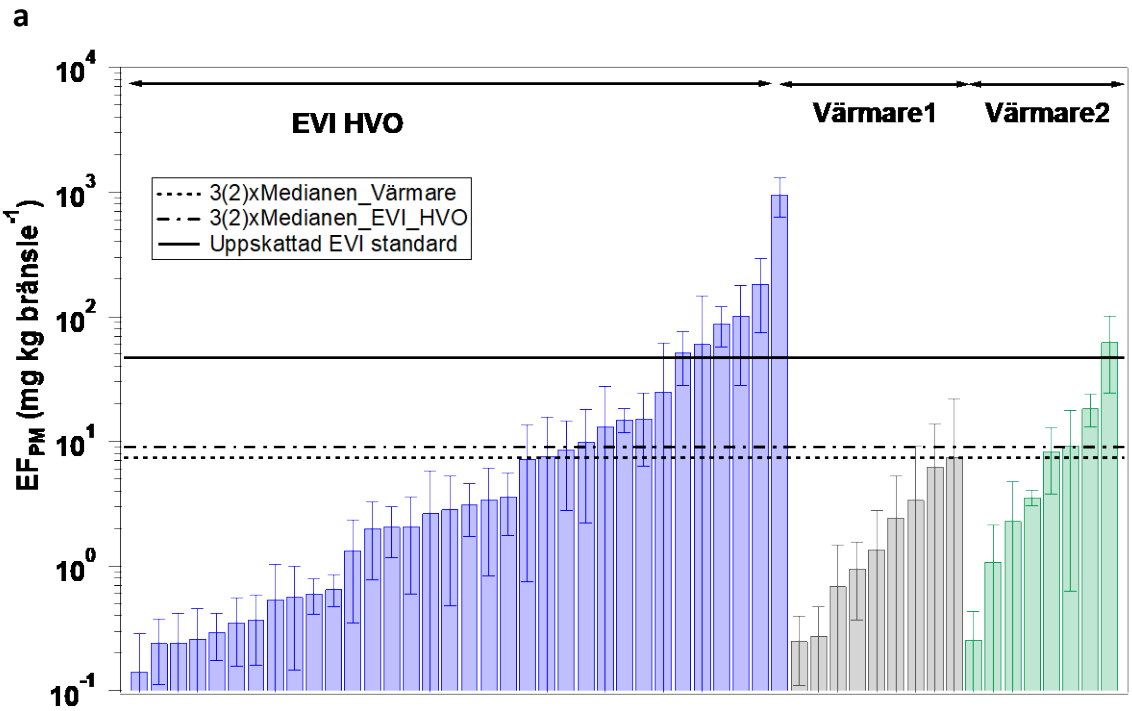
Emissioner från bussvärmare

I Figur 9 så visas medelemissionerna från varje analyserad bussvärmare tillsammans med det 95%-iga konfidensintervallet. Då dataunderlaget är litet, eftersom detta är första gången vi har mätt på emissioner från bussvärmare, jämförs emissionerna också med de avgasrelaterade medelemissionerna från tidigare testade Euroklass VI-bussar med HVO som bränsle. Då det gäller partiklar (PM och PN>23 nm) så var det två bussindividers värmare som emitterade högre än en genomsnittlig Euroklass VI-HVO-buss. Utsläppen var också signifikant högre om bara emissioner från värmarna inkluderades (streckad linje Fig. 9a och 9b). Emissionerna var dock lägre än det uppskattade lagkravet. Vidare kan man se att det var större variation i partikelemissionerna, både gällande massa och antal, för Värmartyp 1 än för Värmartyp 2.

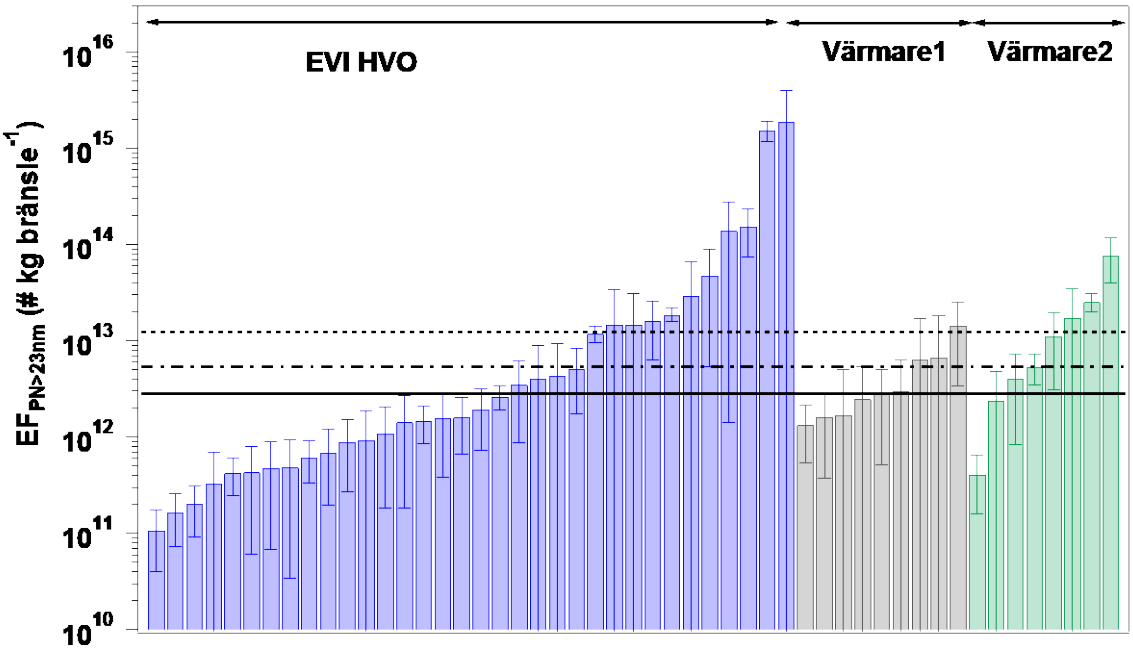
Medianemissionerna för PN>23 nm var ca en faktor två högre för de testade värmarna jämfört med Euroklass VI-HVO-bussarna ($4{,}1\times10^{12}$ vs $1{,}8\times10^{12}$ # kg bränsle^{-1}). Om partiklar <23 nm inkluderas så är medianemissionerna mycket högre för de testade bussvärmarna, ~ en faktor 30 (1.1×10^{14} vs 3.6×10^{12} # kg bränsle^{-1}) (Fig. 9c). Bussvärmare kan således bidra till högre emissioner av små partiklar, s.k. nukleationsmods-partiklar jämfört med Euroklass VI-HVO-bussar.

För NOx så var emissionerna relativt lika mellan de olika bussindividernas värmare och ingen emitterade signifikant högre än en genomsnittlig buss, både vid jämförelse med emissioner från bussvärmare och Euroklass VI-HVO-bussar. För en bussindivids värmare var dock emissionerna högre än det uppskattade lagkravet (Fig. 9d). Medianemissionerna för NOx var mycket lägre för de analyserade värmarna jämfört med tidigare testade Euroklass VI-HVO-bussar (1,8 vs 6,0 g kg bränsle^{-1}).

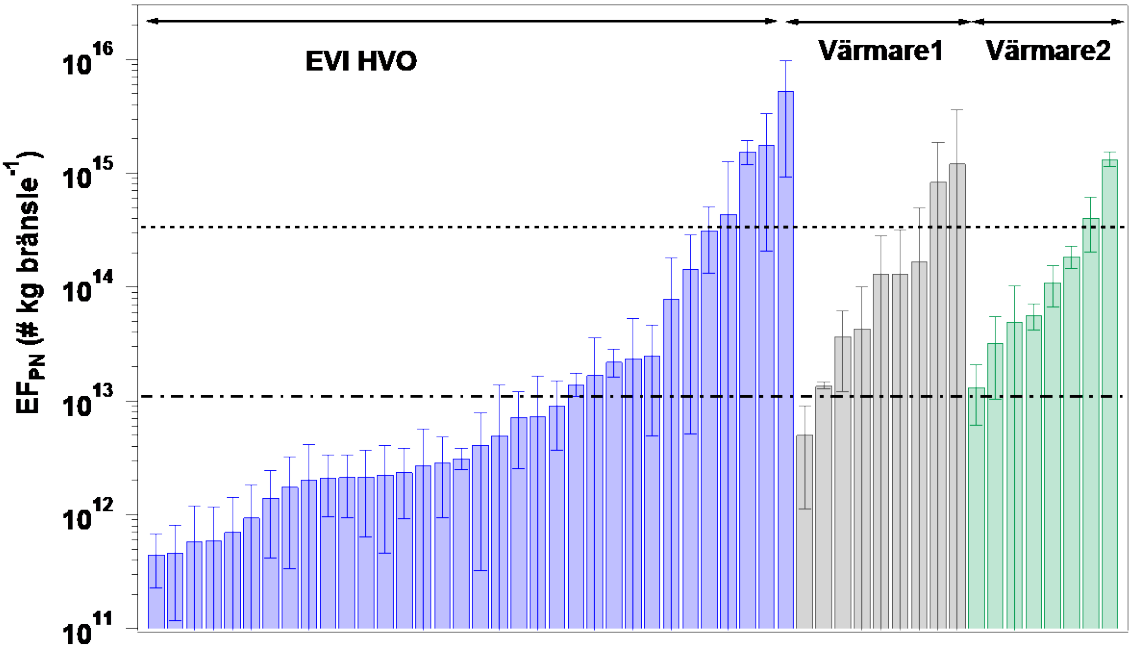
Medelemissionerna för Värmartyp 1 var lägre än för Värmartyp 2 gällande partiklar, dock var variationen mycket stor, 2,6±1,7 vs 13±15 # kg bränsle^{-1}och 4,5±2,7×10^{12} vs 1,8±1,8×10^{13} # kg bränsle^{-1}. Dessa EF ligger i linje med litteraturdata: 1,6–18 mg kg bränsle^{-1} och 8,4×10^{10}–8,6×10^{13} (Danish Technological Institute, 2021), 0,7–7,1 mg kg bränsle^{-1} och 1,0×10^{13}–3,5×10^{13} # kg bränsle^{-1} (Force Technology, 2018) samt 1,7×10^{12} # kg bränsle^{-1} (Vojtisek-Lom et al (2015). Även medelemissionerna av NOx var något lägre för Värmartyp 1 (1,4±0,3 vs 2,0±0,2 g kg bränsle^{-1}). Dessa utsläppsvärden stämmer väl överens med litteraturen 1,4–4,5 g kg bränsle^{-1} (Danish Technological Institute, 2021, Jerksjö, 2018, Vojtisek-Lom et al., 2015).

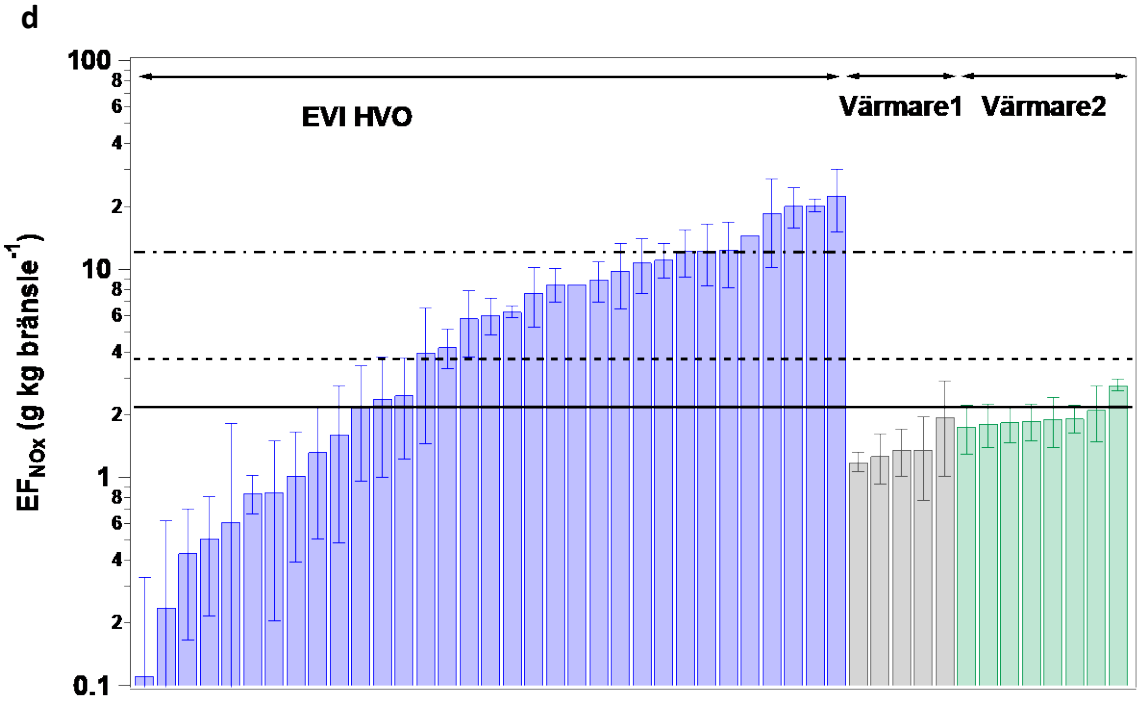


b


EVI HVO
Värmare1
Värmare2
$EF_{PN>23nm}$ (# kg bränsle^{-1})
10^{16}
10^{15}
10^{14}
10^{13}
10^{12}
10^{11}
10^{10}

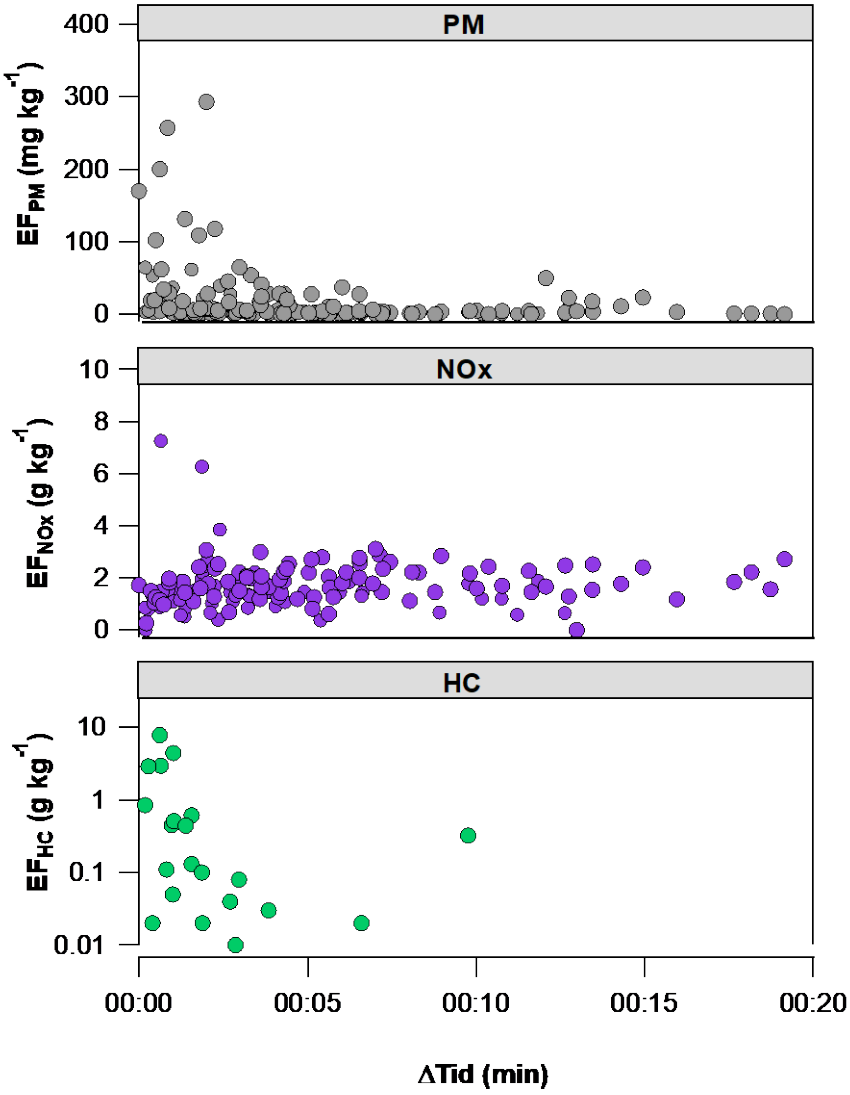
c


EVI HVO
Värmare1
Värmare2
EF_{PN} (# kg bränsle^{-1})
10^{16}
10^{15}
10^{14}
10^{13}
10^{12}
10^{11}



Figur 9 *Jämförelse av emissionerna från Värmartyp 1 och Värmartyp 2 med Euroklass VI-HVO-bussar. EF_{PM} (a), EF_{PN}>23 nm (b), EF_{PN} (c) och EF_{NOx} (d). Solida linjer är uppskattat lagkrav uttryckt i per kg bränsle, streckad linje medianen av medelemissionerna multiplicerat med 3 (^{3Md}EF) för alla testade värmare (13-17st.) för partikelemissioner eller medianen multiplicerat med 2 (^{2Md}EF) för gasemissioner, punktstreckad linje är ^{3Md}EF och ^{2Md}EF av de avgasrelaterade medelemissionerna för alla tidigare testade Euroklass VI-HVO-bussar (34 st.).*

Vid mätningarna observerades det att höga halter av främst partiklar och HC kunde erhållas vid uppstart och avstängning av värmarna. I Figur 10 presenteras emissionerna som en funktion av deltatid, dvs den tid som gått från dess att värmaren startades. Detta är dock en ungefärlig tidsangivelse då det inte alltid var så att värmaren startade exakt då värmaren manuellt slogs på. I rapporten från Danish Technological Institute (Danish Technological Institute, 2021), observerades också höga utsläpp i samband med start och stopp av värmare med rapporterade EF_{PM} maximum på 43–495 mg kg bränsle^{-1} för de testade HVO-drivna värmarna, vilket överensstämmer med observerade EF_{PM} maximum i denna studie (Fig. 10).



Figur 10. *Emissionerna, EF_{PM} (a), EF_{NOx} (b), EF_{HC} (c), som funktion av tiden från då värmaren startades (ΔTid).*

Slutsatser

Medianemissionerna från Euroklass VI-gasbussar är lägre för PM (en faktor ~3–6), PN (en faktor ~ 9–24) och NOx (en faktor ~18–30) jämfört med yngre (årsmodell >2011) respektive även inkluderande äldre Euroklass V-gasbussar. Däremot är HC emissionerna relativt oförändrade i jämförelse med de yngre Euroklass V-gasbussarna.

Emissionerna av metan från de analyserade Euroklass VI-gasbussarna (19 st.) var inom intervallet 0,04–1,9 g kg bränsle^{-1}, vilket ligger under det uppskattade lagkravet uttryckt i per kg förbrukat bränsle (2,1–2,3 g kg bränsle^{-1}). Medianemissionen var 0,16 g kg bränsle^{-1}.

Höga emissioner, främst gällande partiklar och kolväten (HC), från bränsledrivna värmare i elbussar kan erhållas vid start eller avstängning av värmaren. Detta är något som skulle behöva studeras mer ingående i framtida studier.

Medianemissionerna för partiklar (EF_{PM} och $EF_{PN>23nm}$) var relativt lika för de testade värmarna och Euroklass VI-bussar med HVO som bränsle (2,5 vs 3,0 g kg bränsle^{-1} och 4,1 vs 5,4×10^{12} g kg bränsle^{-1}). Dock kan emissionerna av små partiklar, partikeldiameter <23 nm, vara högre från bussvärmare jämfört med de avgasrelaterade emissionerna från Euroklass VI-HVO-bussar.

Medianemissionerna för NOx var lägre för de analyserade värmarna jämfört med tidigare testade Euroklass VI-HVO-bussar (1,8 vs 6,0 g kg bränsle^{-1}). Likaså var variationen av NOx-utsläppen mindre, både vid upprepade mätningar från samma bussindivids värmare och mellan olika bussindividers värmare, jämfört med partikelemissionerna. Emissionerna av NOx för de individuella värmarna låg inom spannet 1,2–2,8 g kg bränsle^{-1}.

Referenser

Danish Technological Institute, Test report Measurement of emissions from diesel fired heaters, January - March 2021, https://cleanbusplatform.eu/storage/files/measurement-of-emissions-from-diesel-heaters-ti-2021-1143767-1.pdf

Force Technology, "Measurement of emissions from diesel fired heaters for buses", report no. 118-22672.02, April 2018

Gustafsson M., et al., (2018) Quantification of population exposure to NO_2, $PM_{2.5}$ and PM_{10} and estimated health impacts, IVL Report C 317.

Hallquist, Å. M., Jerksjö, M., Fallgren, H., Westerlund, J., and Sjödin, Å. (2013) Particle and gaseous emissions from individual diesel and CNG buses, *Atmos. Chem. Phys.*, 13, 5337–5350 DOI: 10.5194/ACP-13-5337-2013

Jerksjö M och Hallquist Å.M. (2016) Measurements of bus emissions 2010-2015, IVL Report B 2254

Jerksjö M, Hallquist Å.M., Fallgren H., Wängberg I. och Westerlund J., (2017), Avgasmätningar på bussar i verklig drift för identifiering av högemitterare, Rapport Nr B 2090

Jerksjö M., 2018, "En kunskapsinventering om utsläpp från bränslevärmare i elbussar", IVL Report no. U 6048.

Kies A, (2017) A contribution to the analysis of fuel efficiency measures for heavy-duty vehicles, PhD Thesis, Technische Universität Graz Institut für Verbrennungskraftmaschinen und Thermodynamik, DOI: 10.3217/978-3-85125-578-2

Le Breton M., Psichoudaki M., Hallquist M., Watne Å. K., Lutz A., Hallquist Å. M. (2019) Application of a FIGAERO ToF CIMS for on-line characterization of real-world fresh and aged particle emissions from buses, *Aerosol Sci. Tech.*, 53 (3), 244-259, DOI: 10.1080/02786826.2019.1566592

Liu Q, Hallquist Å. M., Fallgren H., Jerksjö M., Jutterström S., Salberg H., Hallquist M., Le Breton M., Pei X., Pathak R. K., Liu T., Lee B., Chan C. K. (2019) Roadside assessment of a modern city bus fleet: Gaseous and particle emissions, *Atmos. Environ. X*, (2019), DOI: 10.1016/J.AEAOA.2019.100044

Lou D., Ren Y., Li Xiang, Zhang Y., and Sun X. (2020) Effect of Operating Conditions and TWC Parameters on Emissions Characteristics of a Stoichiometric Natural Gas Engine, *Energies*, 13, 4905. https://doi.org/10.3390/en13184905

Posada Francisco (2009) CNG Bus Emissions Roadmap: from Euro III to Euro VI, ICCT The International council on clean transportation, https://theicct.org/sites/default/files/publications/CNGbuses_dec09.pdf

Querol et al., (2004) Speciation and origin of PM10 and PM2.5 in selected European cities, *Atmospheric Environment* 38, 6547

Swedish In-Service Testing Programme on Emissions from Heavy-Duty Vehicles 2015, *Report for the Swedish Transport Agency* AVL MTC AB #OMT2006 2015

Vojtisek-Lom et al (2015), Measurement of emissions from independent bus heaters-, 19th ETH Conference on Combustion Generated Nanoparticles

Watne Å. K., Psichoudaki, M., Ljungström E., Le Breton M., Hallquist M., Jerksjö, M., Fallgren H., Jutterström S., Hallquist, Å., M. (2018) Fresh and Oxidized Emissions from In-Use Transit Buses Running on Diesel, Biodiesel, and CNG, *Environ. Sci. & Tech.,* 52 (14), 7720-7728, DOI: 10.1021/ACS.EST.8B01394

Zhou, L., Hallquist Å. M., Hallquist M., Salvador C. M., Gaita S. M., Sjödin Å., Jerksjö M., Salberg H., Wängberg I., Mellqvist, J., Liu Q., Lee B. P., and Chan C. K. 2020, A transition of atmospheric emissions of particles and gases from on-road heavy-duty trucks, *Atmos. Chem. Phys.,* 20, 1701–1722.

Zhou LY., Salvador C. M., Priestley M., Hallquist M., Liu Q. Y., Chan C. K., Hallquist Å. M. (2021) Emissions and Secondary Formation of Air Pollutants from Modern Heavy-Duty Trucks in Real-World Traffic—Chemical Characteristics Using On-Line Mass Spectrometry, *Environ. Sci. & Tech.,* 55 (21), DOI: 10.1021/ACS.EST.1C00412

IVL Svenska Miljöinstitutet AB // Box 210 60 // 100 31 Stockholm
Tel 010-788 65 00 // www.ivl.se