TRITA-ITM-RP 2023:5

Luftkvalitet för pendlare – Mätning av PM10, PM2.5 och sot i Stockholm 2020 och 2022

Ulf Olofsson och Minghui Tu

Institutionen för Maskinkonstruktion

Kungliga Tekniska Högskolan

Sammanfattning

Pendlares luftkvalitet kan variera, beroende på om man reser med tex. tunnelbana, buss, båt, eller om man som alternativ cyklar eller promenerar. Denna rapport presenterar luftkvalitetsmätningar för pendlare i Stockholm. PM10, PM2.5 och sot (BC) har mätts i passagerarutrymmen i tunnelbanevagnar, bussar och båtar, samt vid cykling och vid promenader. Dessa mätresultat jämfördes med halterna som uppmättes när man väntade på hållplatser, och också med den urbana bakgrundsnivån i Stockholm.

Mätresultaten från denna studie visar att pendlare som reser med båt eller buss har en luftkvalitet (timmedelvärde) som understiger WHO:s rekommenderade dygnsmedelvärden för PM2.5- och PM10-halter. Vid resa i tunnelbanevagn, så överskreds WHO:s medelvärden när tågen trafikerade spårtunnlar. För äldre otäta tunnelbanevagnar uppmättes de högsta PM2.5 och PM10-halterna i denna studie. Även de uppmätta sot-halterna var de högsta vid resa i de äldre otäta tunnelbanevagnarna. Vid promenad och cykling uppmättes PM2.5-, PM10- och sot-halter som var i paritet de som uppmättes för bussresenärer. Resultaten visade också på små skillnader i luftkvalitet på var i passagerarutrymmena man placerade sig vid resan.

Nyckelord: PM10, PM2.5, sot, kollektivresenärer, tunnelbana, buss, båt, cykling, promenad

Förord

Projektet syftar till att studera luftkvaliteten för kollektivresenärer. Studien genomfördes på uppdrag åt Trafikverket. Kontaktperson på Trafikverket har varit Hung Nguyen. Nisha Singh och Ahsan Kadevalappil Ajilan som är studenter på KTH, utförde mätningarna i delstudie 2. I delstudie 2 så användes två optiska PM-haltsmätare från SLB-analys. Max Elmgren på SLB-analys var delaktig i parallellkalibreringen av de PM- såväl som sotmätaren.

1. **Inledning**

Pendlare utsätts för luftkvalitet (partikelhalter) som varierar beroende på resandeformen: spårbunden, på väg och på vatten. Ett ofta använt mått på luftkvaliteten är PM10 och PM2.5 (massan av partiklar med en diameter mindre än 10 µm respektive mindre än 2,5 µm), mätt i µg/m^3. Det finns gränsvärden för partiklar i utomhusluft i gällande miljökvalitetsnorm och det finns också miljökvalitetsmål antagna av riksdagen gällande PM10 och PM2.5 [1,2]. WHO [3] har nyligen uppdaterat sina riktlinjer och det är WHO:s riktlinje som används som jämförelse i denna studie, se Tabell 1. Miljökvalitetsnormerna har i dagsläget inga gränsvärden för luftburna partiklar i bil- och järnvägstunnlar. Utsläppen av sot (på engelska Black Carbon och med förkortningen BC) har på senare år blivit ett alltmer uppmärksammat miljöproblem. Sot är en kemiskt heterogen blandning av kolföreningar som bidrar väsentligt till den globala uppvärmningen och har också visat sig orsaka allvarliga hälsoproblem [4]. Sot är inte reglerat i miljökvalitetsnormen.

Om resan sker under jord i tunnlar eller inte påverkar partikelhalterna. Det finns få svenska studier av partikelhalterna som en resenär utsätts för vid pendling. En studie i Stockholms tunnelbana visar att nivåer mellan 50 % upp till 100 % av partikelhalterna i tunnelbanetunnlarna kunde uppmätas inne i passagerarkupéer [5]. Ju längre tågtunnel desto närmare var partikelhalterna i passagerarutrymmena, de halter som kunde registreras i tågtunnlarna [5]. I en annan svensk studie på pendeltåg som trafikera Arlandatunneln och Citybanan [6] har visat på att halterna i vagnarna ökade signifikant vid färd genom tunnlar och med ytterligare upp till 25 % när dörrarna öppnades vid överbyggda perronger. I denna studie jämfördes också luftkvaliteten mellan tågförare och pendlare. Tågförarna utsattes för betydligt lägre PM10-halter jämfört med pendlare på grund av förarhyttens ventilation. För PM2.5 halterna registrerades mer likvärdiga nivåer mellan pendlare och tågförare. Det kan noteras att Citybanans plattformar på Odenplan och Stockholm City har plattformsavskiljande dörrar. I studier från Seouls tunnelbana har man dragit slutsatsen att man kan förbättra plattformens luftkvalitet med plattformsdörrar men att detta leder till ökade partikelkoncentrationer i tågets passagerarkabiner (Son et al., [7]; Lee et al., [8]). I en studie [9] i den nyöppnade tunnelbanan i Köpenhamn konstaterades att PM2.5-halterna i passagerarkabinerna mestadels var lika höga eller högre än på plattformar. En möjlig förklaring till de högre halterna i passagerakabinerna anges till att vagnventilationssystem använder tunnelluft för att tillföra luft till passagerakabinerna i kombination med plattformsavskiljande dörrar. Det finns några studier från tunnelbanesystem utan plattformsdörrar. Querol et. al [10] fann att för de moderna tunnelbanevagnarna som användes i Barcelona, var PM10-koncentrationerna i tåget, fem gånger lägre än på en underjordisk plattform. I en studie från 2016, jämfördes i Atens tunnelbana äldre (otäta) tunnelbanevagnar med moderna (täta) [11]. I de äldre vagnarna gick fönstren att öppna, vilket inte gick i de moderna. Skillnaden i partikelhalt i de två typerna av tågkabiner var stor. Mätningar i de äldre vagnarna angav PM10 -koncentrationer på cirka 240 µg/m^3 medan de i det nya uppmättes lägre nivåer om ca 60 µg/m^3.

I en studie utförd i Lissabon [12] jämfördes pendlares exponering för partiklar (PM) och sot (BC) när man reser med bil, cykel, tunnelbana och buss. De uppmätta masskoncentrationerna av PM2,5 och PM10 var högst i tunnelbanan. Å andra sidan, de högsta sotkoncentrationerna uppmättes i bil och busskabiner. De högsta inhalerade doserna observerades oftast vid cykelresor, på grund av de längre reseperioderna i kombination med ökad fysisk aktivitet.

Denna studie syfta till att mäta luftkvaliteten för pendlare som använder promenad, cykel, buss, tunnelbana och båt som transportmedel i Stockholmsregionen. Som luftkvalitetsindikatorer har PM10, PM2.5 och sot (BC) använts.

Tabell 1. *WHO:s riktlinje för partiklar i utomhusluft, PM10 och PM2.5 [3].*

PM- halt	WHO (µg/m^3)	Anmärkning
PM10	45	24-timmars medelvärde
PM2.5	15	24-timmars medelvärde

2. Metodik

Två testserier har utförts i denna studie. I den första testserien studerades luftkvaliteten vid pendling mellan Södermalm och Tekniska högskolans lokaler på Östermalm i Stockholm. Mätperioden var mellan september och november 2020. Denna delstudie avbröts efter Covid relaterade rekommendationer om att man skulle minska resandet hade införts. Som mätutrustning användes en optisk partikelräknare TSI OPS 3300 och en sot (BC) mätare AETHLABS ® Microaeth MA200 som har en inbyggd GPS. All utrustning var placerade i en vätska och inloppen var vattenavskiljande, se Figur 1. I denna delstudie är alla PM- och sot-jämförelser relativa jämförelser med samma kalibreringsfaktor för alla mätplatser. Arbetspendlingen utfördes genom resa med: C20-tåg, CX-tåg, buss, cykel och som promenad. Totalt minst 30 h av mätdata för varje trafikslag samlades in. För tågpendlingen samlades mätdata in minst 15h i CX- respektive C20-tåg. Promenadtiden var ca 10 h. Som jämförelsedata användes den urbana bakgrundsnivån uppmätt av SLB-analys [13] samt den kalibrerade luftkvalitetsmätstationen på Tekniska Högskolans tunnelbaneplattform [14]. CX-tåg är en äldre tunnelbanevagn med otäta passagerarutrymmen och öppningsbara fönster. C20-tågen har täta passagerarutrymmen och fönster som inte ar öppningsbara. Samtliga tunnelbaneplattformar som användes i denna delstudie var underjordiska. Bussarna som användes var stombusslinjer (blåbusslinjer) i Stockholms innerstad där busshållplatserna var utomhus. Linjerna trafikeras av ledbussar i blå färg till skillnad från de övriga i rött och trafikeras generellt med högre turtäthet än andra linjer. Vid start av varje pendlingsresa så aktiverades mätutrustningen 10 minuter innan pendlingsresans början. Dessa 10 minuter användes för uppvärmning av mätinstrumenten och har inte inkluderats i analysen av mätdata.

I den andra delserien med mätperioden maj till juni 2022 reste två teknologer med tunnelbanetåg, buss och båt. Totalt 15 pendlingsresor fram och tillbaka utfördes för varje trafikslag. Luftkvaliteten uppmättes både under resan i passagerakabinen och när man väntade på respektive trafikslags hållplats. För tunnelbanetågen fanns det nu tre olika tågtyper att studera: CX, C20 och C30. I denna delstudie utfördes en jämförande kalibrering av mätutrustningen (PM10, PM2.5 och sot (BC)) mot SLB:s mätstation på Hornsgatan. Samma kalibreringsfaktorer användes för samtliga trafikslag. Notera att två bärbara partikelräknare för PM2.5 och PM10 användes i denna studie. Partikelräknarna inlånades från SLB-analys och var av märket Lighthouse (model 3016 IAQ). En partikelräknare användes

tillsammans med sotmätaren (AETHLABS ® Microaeth MA200) i mitten av respektive trafikslags passagerarkabin och den andra användes i samma passagerarkabins ände i närheten av en vägg.

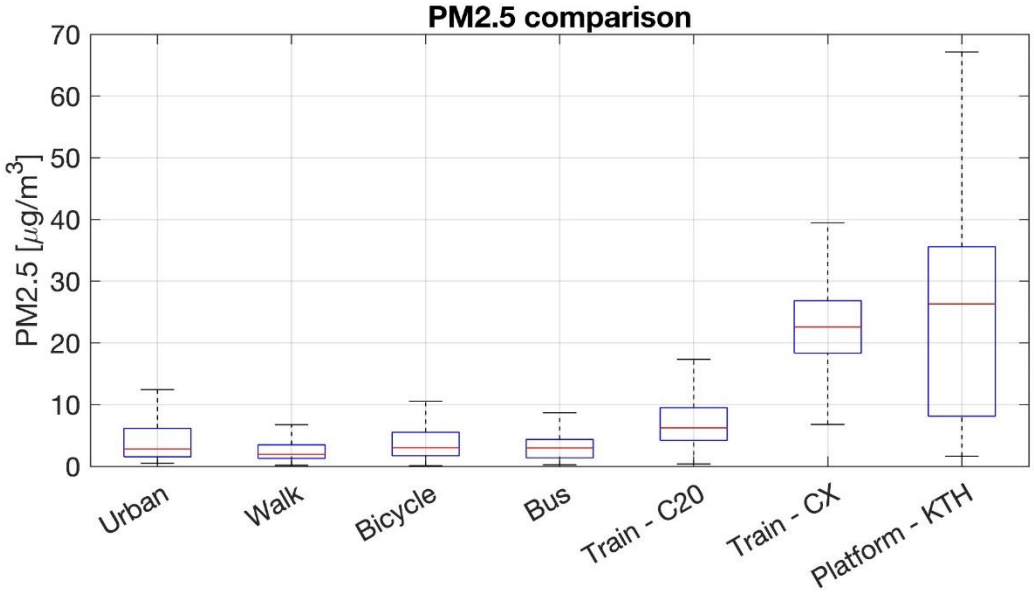
Med tunnelbanetåg genomfördes pendlingen mellan de underjordiska plattformarna Mörby C och Telefonplan. Telefonplan är en utomhusplattform och ligger precis innan spårtunnelns början. Mörby C är en ändhållplats där tågen byter riktning. Detta medför att tågen bromsas ner till en lägre hastighet (30 km/h) innan plattformen jämfört med (50 km/h) vid en vanlig plattform. De nya C30-tågen har täta vagnar och aktiv ventilation av passagerarkabinen. Bussresorna var mellan Odenplan och Gullmarsplan. Samtliga busshållplatser är utomhus vid trafikerade gator. Bussarna som användes var stombusslinjer (blåbusslinjer). Båtpendlingen genomfördes mellan Ropsten och Nybroplan. Båda hållplatserna var här utomhus. En detaljerad plan för hur kabinmätningarna utfördes för respektive trafikslag presenteras i Appendix A.

Figur 1. *Foton av den bärbara mätutrustningen och som monterad på främre pakethållare på en cykel.*

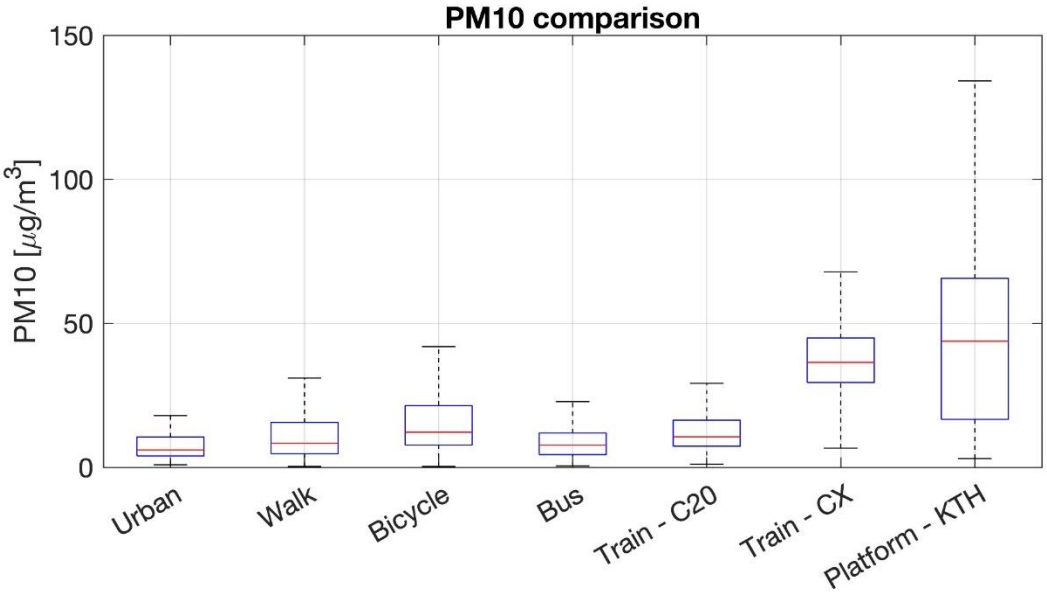
3. Resultat

I Figurerna 2,3 och 4 redovisas resultaten från mätningarna av PM2.5, PM10 och sot (BC) från 2020 i form av box-plottar. Resultaten visar att de högsta nivåerna uppmättes CX tågens passagerarkabiner. Halterna som uppmättes i CX-passagerarkabinerna var signifikant högre, jämfört med samtliga övriga pendlingsmoderna. Noterbart är att de uppmätta halterna i CX-tågen når samma nivå som den som uppmättes på Tekniska högskolans underjordiska plattform. Tekniska högskolans plattform ligger mitt i en lång tågtunnel. CX-tågen passagerakabiner är otäta med öppningsbara fönster, tillskillnad mot C20

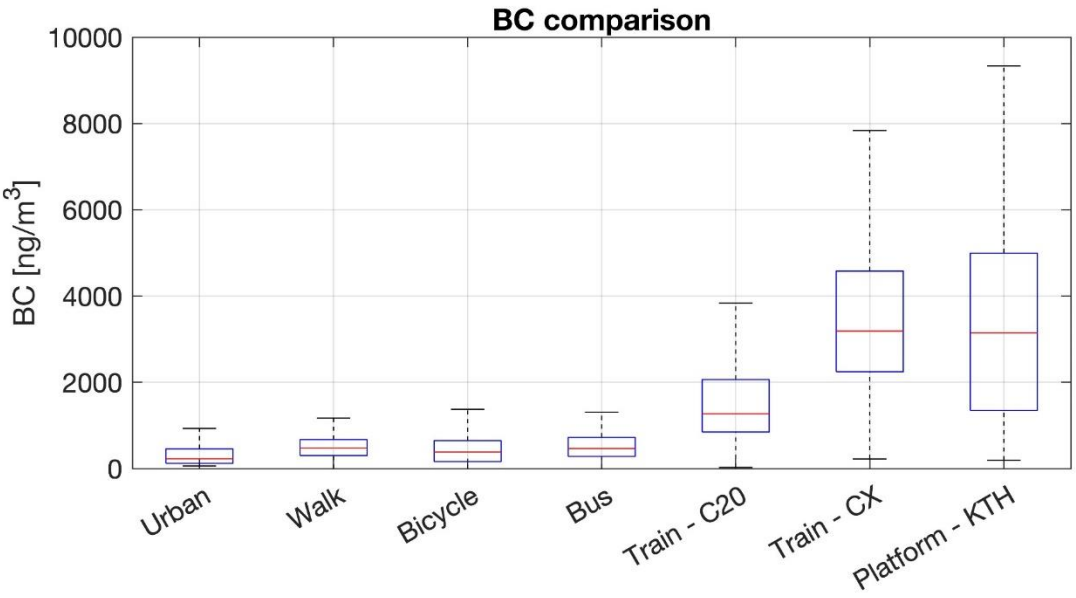
tågen som har täta kabiner. Också PM2.5- och sot-halterna var högre i C20 tågen jämfört med pendling med buss eller på cykel. Däremot var C20-tågens PM10-halterna på samma nivå som vid pendling med buss eller på cykel.



Figur 2. *Box plottar över PM2.5-halter, tim-medelvärden uppmätta 2020. Den röda mittenlinjen i respektive box är medianvärdet och boxen innehåller 50 % av mätvärdena. Den nedre delen av boxen representerar 25 % percentilen och den övre delen representerar 75 % percentilen.*

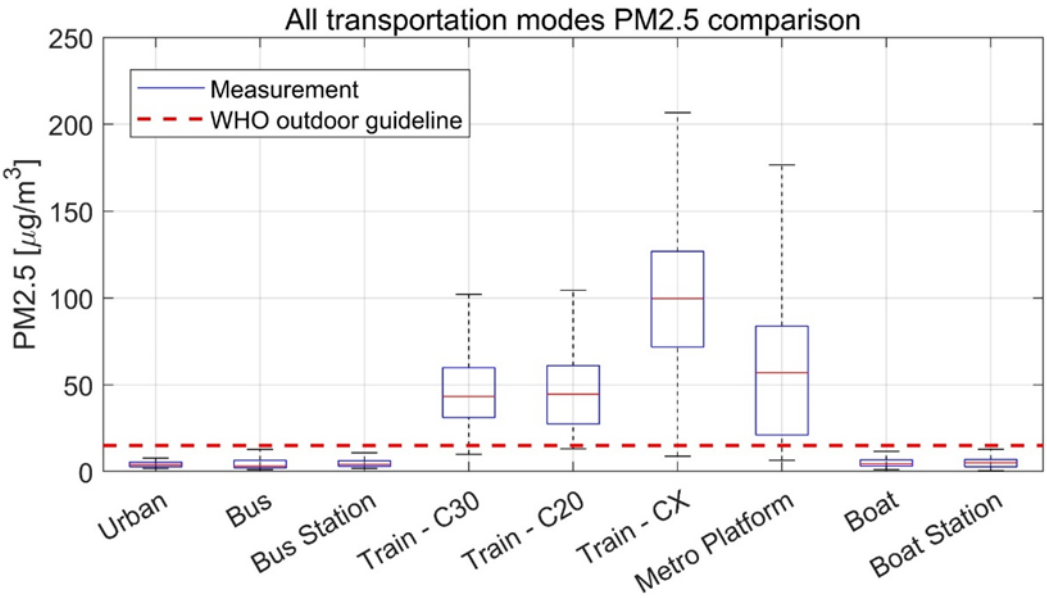


Figur 3. *Box plottar över PM10-halter, tim-medelvärden uppmätta 2020. Den röda mittenlinjen i respektive box är medianvärdet och boxen innehåller 50 % av mätvärdena. Den nedre delen av boxen representerar 25 % percentilen och den övre delen representerar 75 % percentilen.*

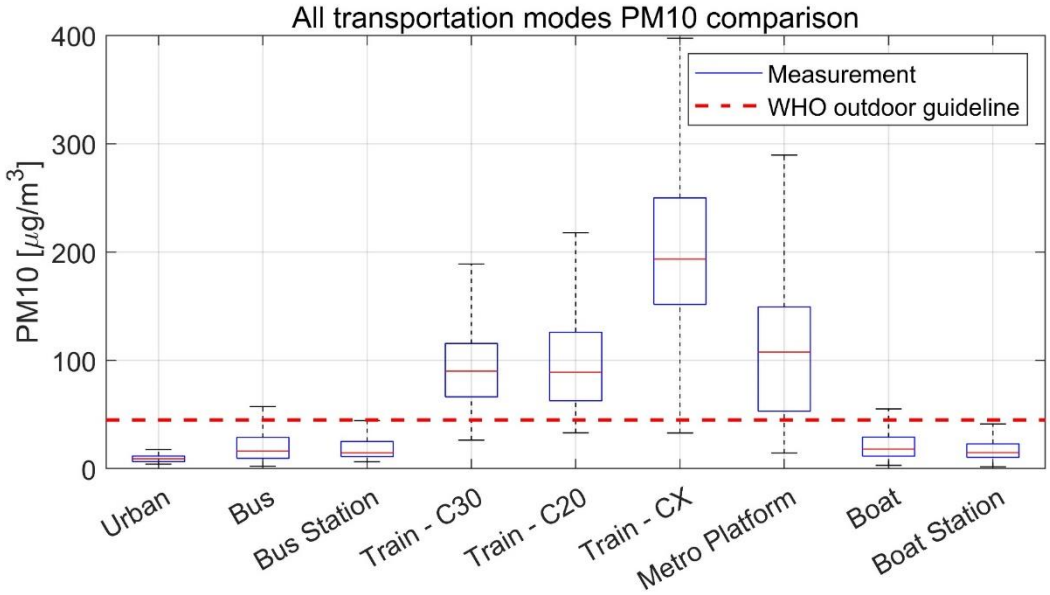


Figur 4. *Box plottar över sot-halter (BC), tim-medelvärden uppmätta 2020. Den röda mittenlinjen i respektive box är medianvärdet och boxen innehåller 50 % av mätvärdena. Den nedre delen av boxen representerar 25 % percentilen och den övre delen representerar 75 % percentilen.*

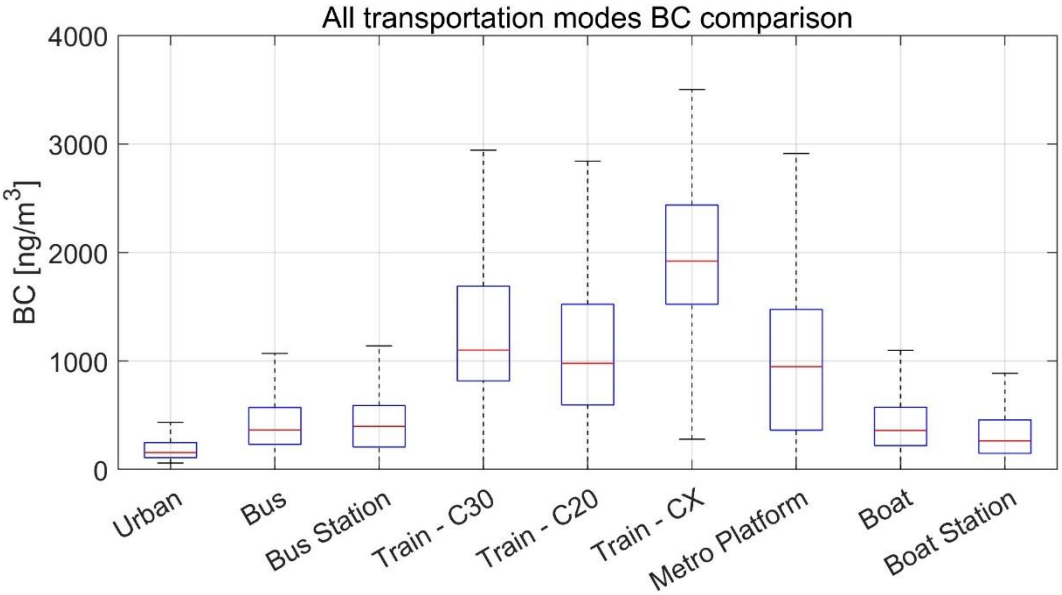
I figurerna 5,6 och 7 redovisas resultaten från mätningarna av PM2.5, PM10 och sot (BC) från 2022 i form av box-plottar. Resultaten visar att de högsta nivåerna uppmättes i CX tågens passagerakabiner. Halterna som uppmättes i CX-passagerarkabinerna var signifikant högre, jämfört med de övriga pendlingsmoderna. De uppmätta halterna i CX-tågen når högre nivå, än de som uppmättes på tågplattformarna i denna studie. Dessa två plattformar ligger utomhus just efter spårtunnels slut (Telefonplan) respektive i en tunnelände (Mörby C). Noterbart är att CX-tågen passagerakabiner är otäta med öppningsbara fönster, tillskillnad mot C20 och C30-tågen som har täta kabiner. C30-tågen har dessutom aktiv ventilation för passagerarutrymmet. Om man undantar tunnelbaneresorna så ligger samtliga resultat för PM10- och PM2.5-halterna under WHO:s rekommenderade nivåer.



Figur 5. *Box plottar över PM2.5-halter, tim-medelvärden uppmätta 2022. Den röda mittenlinjen i respektive box är medianvärdet och boxen innehåller 50 % av mätvärdena. Den nedre delen av boxen representerar 25 % percentilen och den övre delen representerar 75 % percentilen. Den röda streckade linjen representerar WHO:s rekommenderade gränsvärde för utomhusluft.*

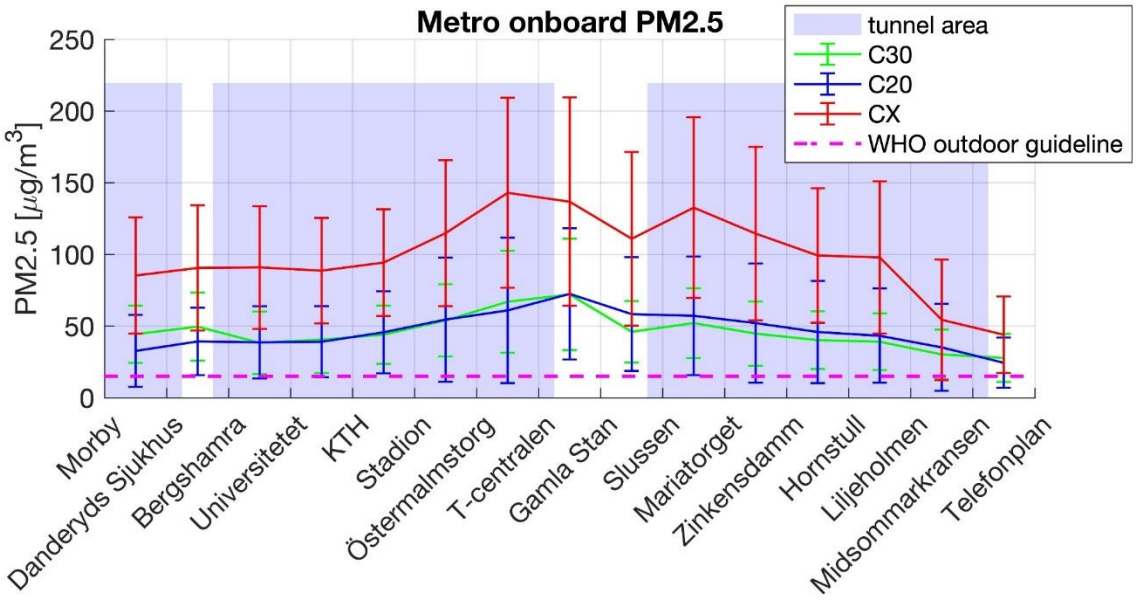


Figur 6. *Box plottar över PM10-halter, tim-medelvärden uppmätta 2022. Den röda mittenlinjen i respektive box är medianvärdet och boxen innehåller 50 % av mätvärdena. Den nedre delen av boxen representerar 25 % percentilen och den övre delen representerar 75 % percentilen. Den röda streckade linjen representerar WHO:s rekommenderade gränsvärde för utomhusluft.*

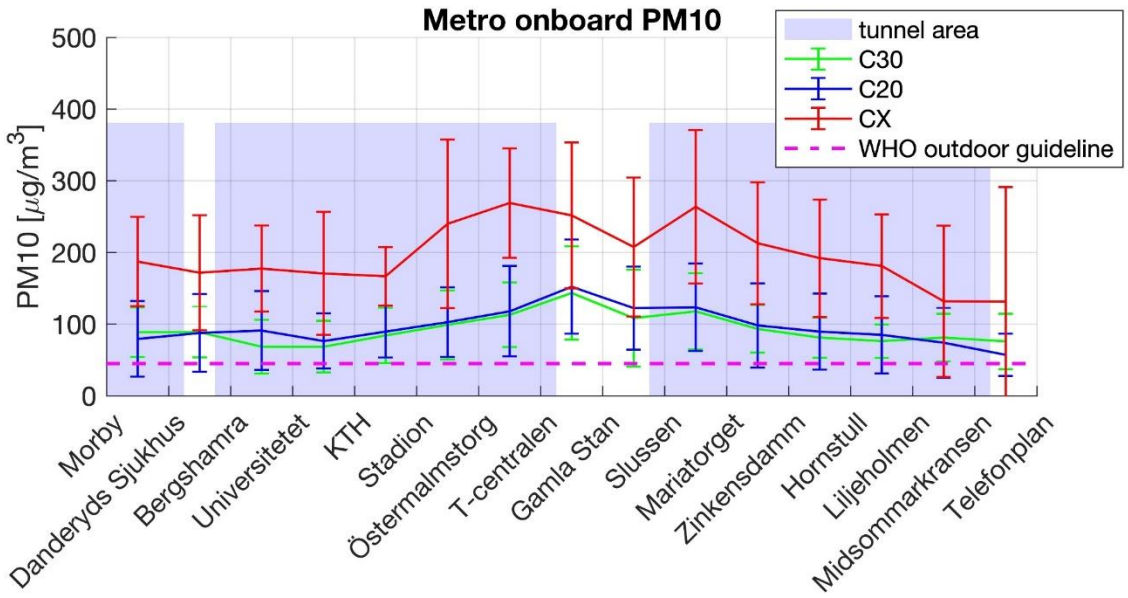


Figur 7. *Box plottar över sot-halter (BC), tim-medelvärden uppmätta 2022. Den röda mittenlinjen i respektive box är medianvärdet och boxen innehåller 50 % av mätvärdena. Den nedre delen av boxen representerar 25 % percentilen och den övre delen representerar 75 % percentilen.*

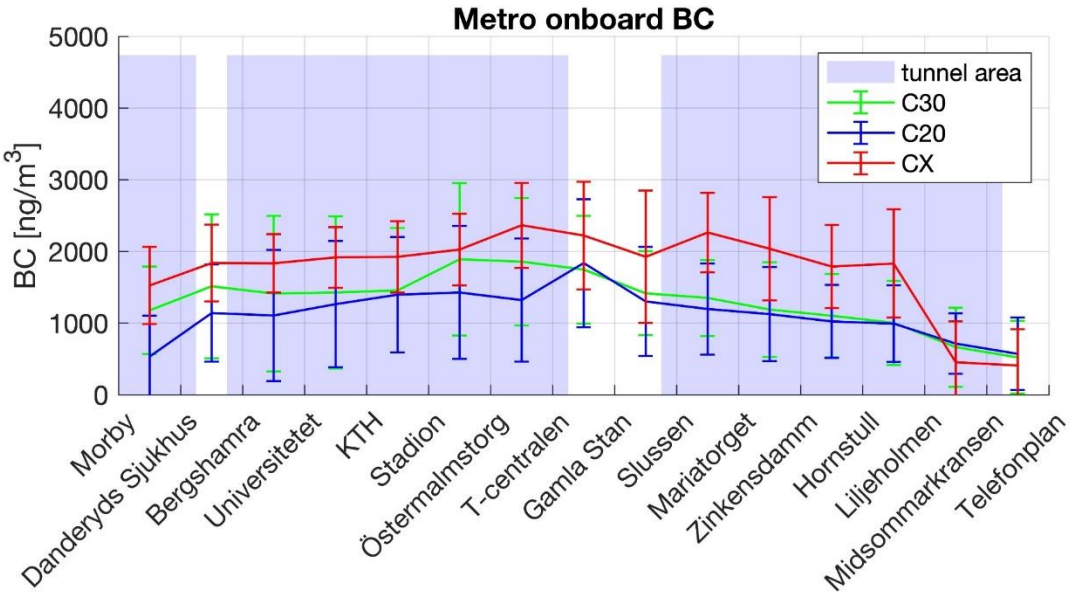
I Figurerna 8 till 16 redovisas luftkvaliteten i respektive passagerarkabin från resans början till resans slut. Resultaten visas som ett medelvärde. Dessutom redovisas spridningen i form av plus minus en standardavvikelse för respektive hållplats. För tunnelbaneresenären så visar resultaten presenterade i Figurerna 8–10, att samtliga uppmäta halter är högre i de plattformar som är placerade under jord i jämförelse med utomhusplattformen Telefonplan. Denna ökning är störst för de otäta CX-vagnarna. De mindre öppna passagerna tex mellan Slussen och T-centralen minskar halterna något och detta framför allt för de otäta CX-vagnarna. För bussresenären var PM- och sot-halterna förhållandevis konstanta under resan, se Figurerna 11–13. PM-halterna var här under hela resan i medeltal under de av WHO rekommenderade värdena. För båtresenären var också PM-halterna under hela resan i medeltal under de av WHO rekommenderade värdena, se Figurerna 14–15. PM-och sot-halterna var förhållandevis konstanta under hela båtresan med en liten tendens till toppvärden kring passagen Nacka strand - Blockhusudden för PM-halterna.



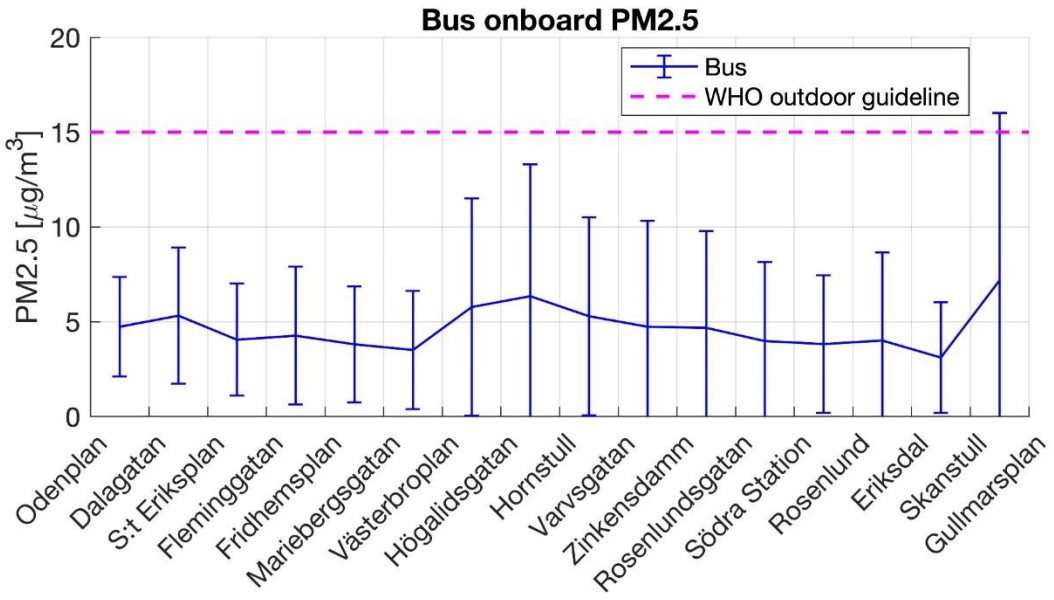
Figur 8. *PM2.5 halterna i tunnelbanetågens passagerarkabiner. CX, C20 och C30 är olika varianter av tunnelbanetåg. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*



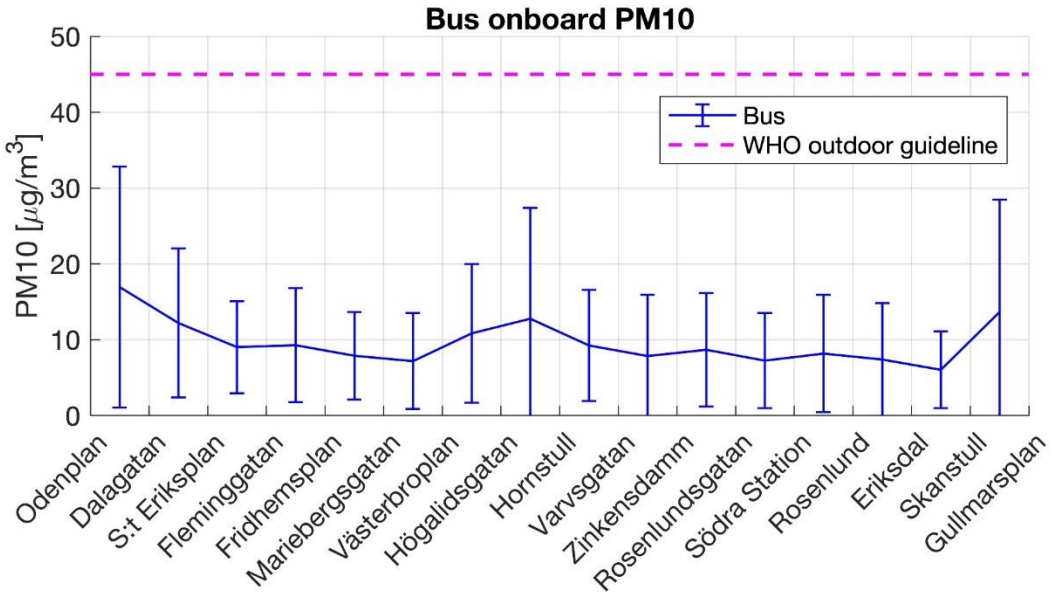
Figur 9. *PM10 halterna i tunnelbanetågens passagerarkabiner. CX, C20 och C30 är olika varianter av tunnelbanetåg. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*



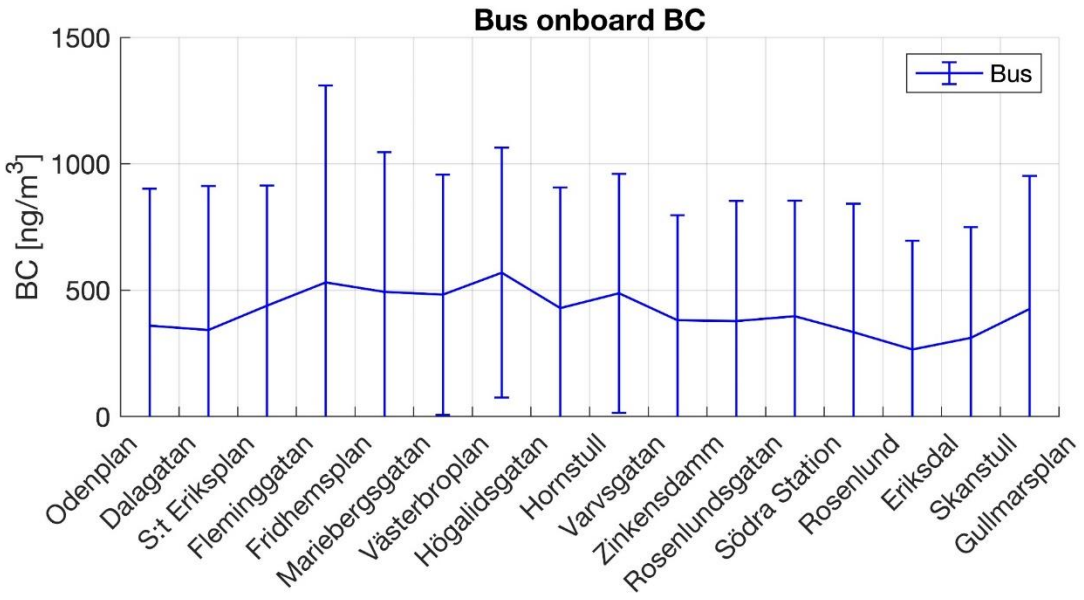
Figur 10. *Sot-halterna (BC) i tunnelbanetågens passagerarkabiner. CX, C20 och C30 är olika varianter av tunnelbanetåg. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats*.



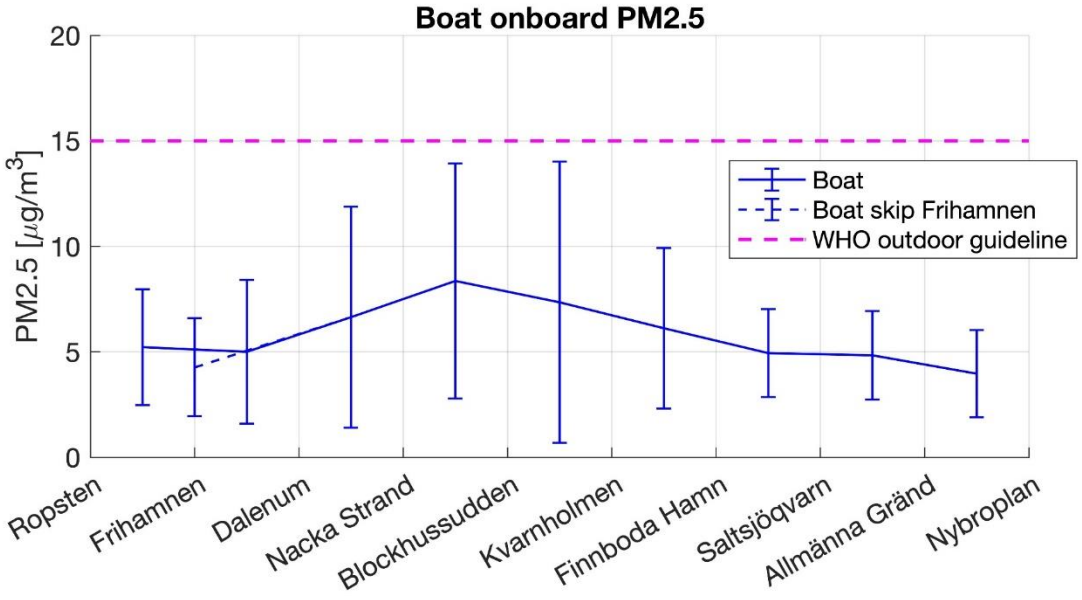
Figur 11 *PM2.5-halterna i bussarnas passagerarkabiner. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*



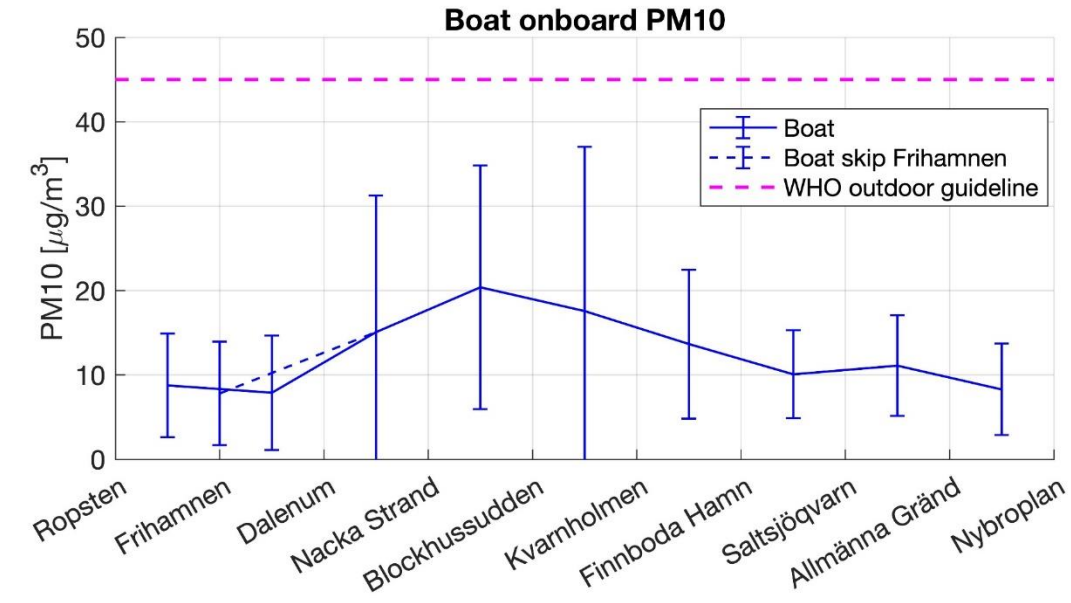
Figur 12. *PM10-halterna i bussarnas passagerarkabiner. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*



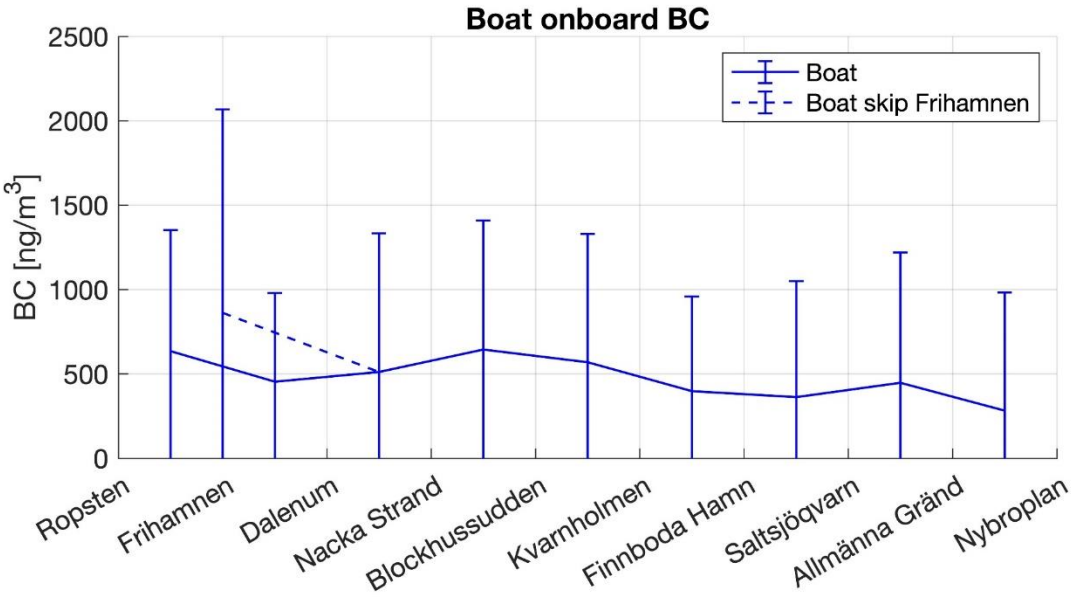
Figur 13. *Sot-halterna (BC) i bussarnas passagerarkabiner. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*



Figur 14. *PM2.5-halterna i båtarnas passagerarkabiner. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*

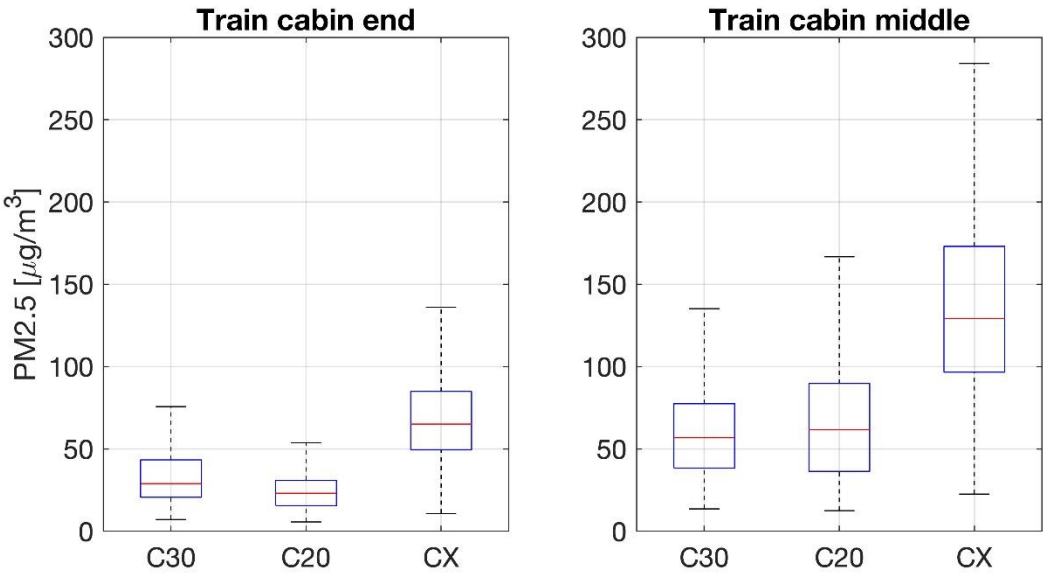


Figur 15. *PM10-halterna i båtarnas passagerarkabiner. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*

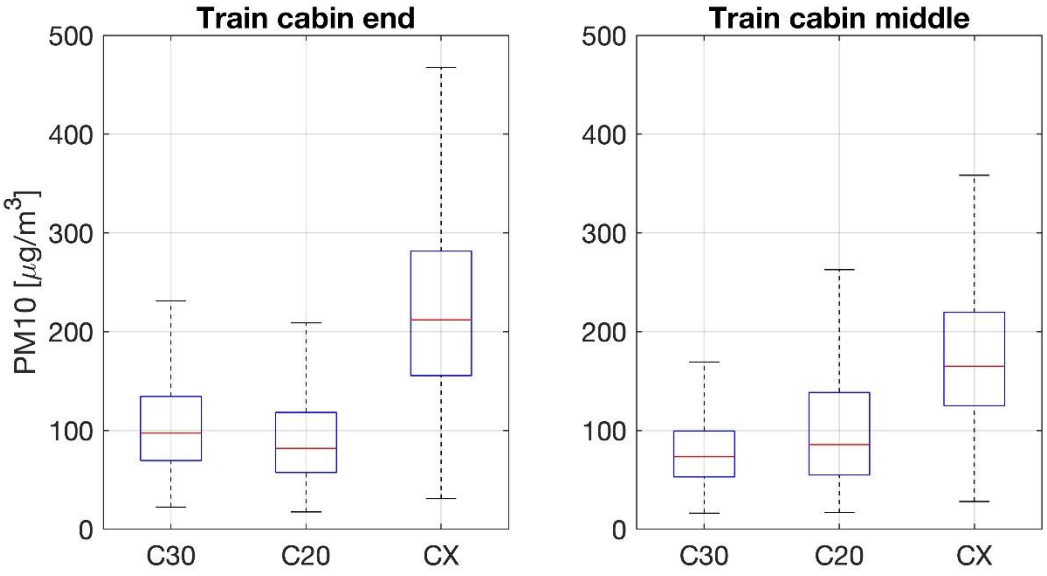


Figur 16. *Sot-halterna (BC) i båtarnas passagerarkabiner. Resultaten presenteras i form av medelvärde plus minus en standardavvikelse mot respektive hållplats.*

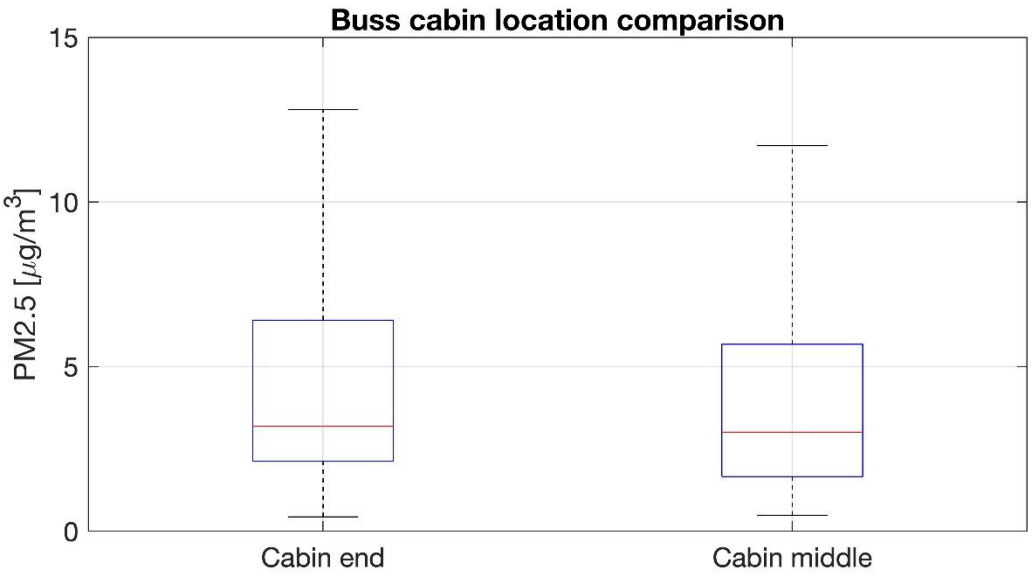
Under studien som genomfördes 2022 användes två optiska partikelräknare som transporterades av två studenter. En av studenterna placerade sig mitt i passagerakabinen vid varje mättillfälle och den andra studenten placerade sig vid passagerakabinens ena ände så nära en vägg som möjligt. Resultaten uppdelat på var man har satt sig i passagerkabinen presenteras i Figurerna 17–22. Vid buss- och båtresa kunde bara marginella skillnader noteras mellan var i passagerakabinen man var placerad, se Figurerna 19–22. För tunnelbanevagnarna, som har jämförelsevis längre passagerautrymmen, kunde skillnader noteras för PM2.5 halterna, se Figurerna 17–18.



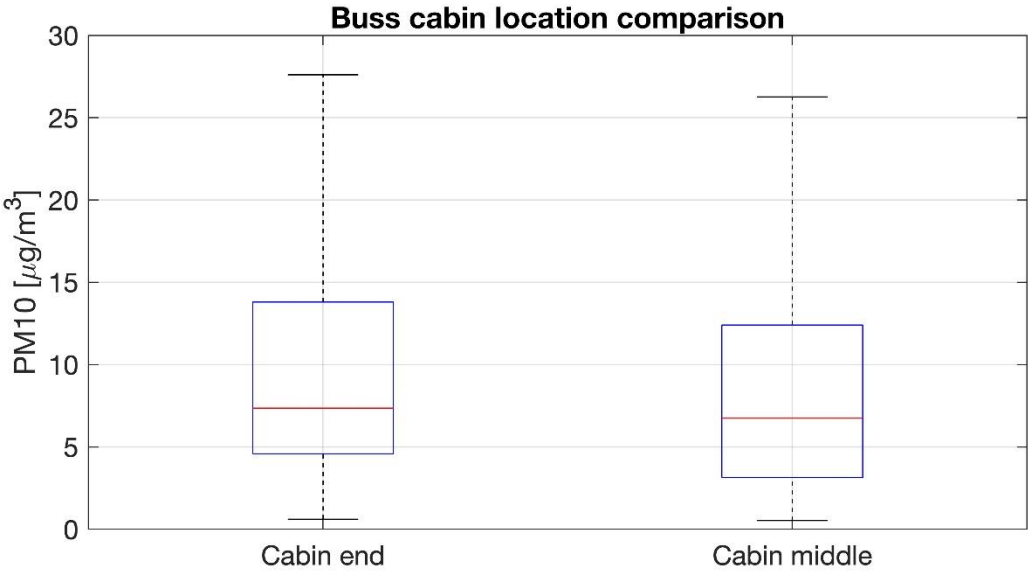
Figur 17. *Box plottar över PM2.5-halter i tunnelbanans passagerarkabiner. Till vänster resultat från mätning vid vagnsände och till höger resultat från mätning i kabinens mitt.*



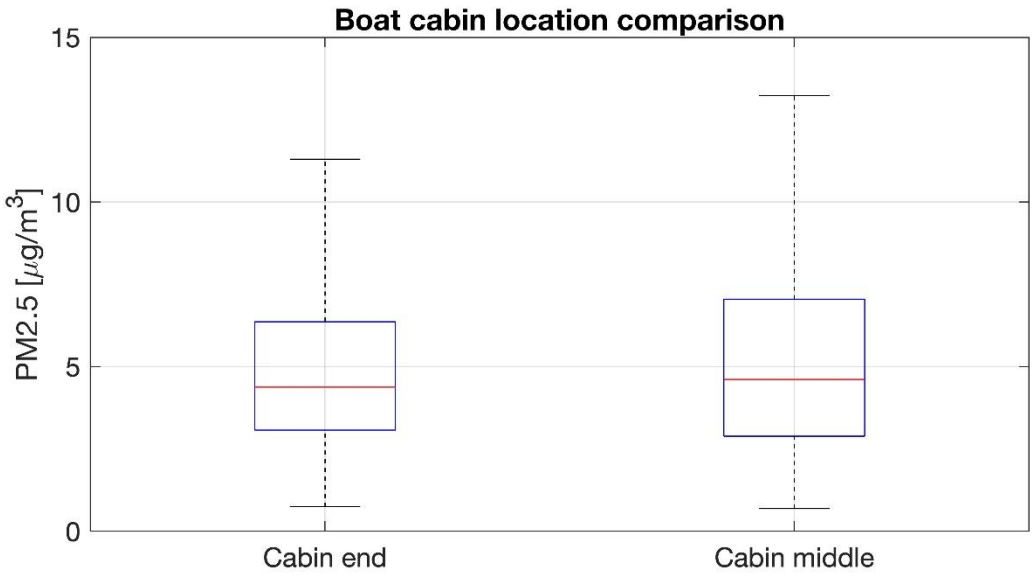
Figur 18. *Box plottar över PM10-halter i tunnelbanans passagerarkabiner. Till vänster resultat från mätning vid vagnsände och till höger resultat från mätning i kabinens mitt.*



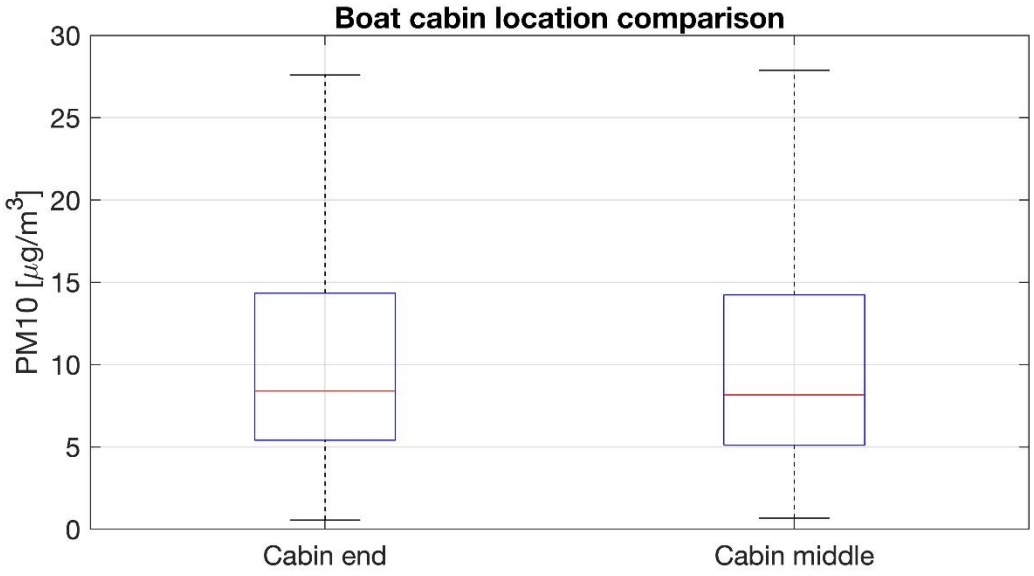
Figur 19. *Box plottar över PM2.5-halter i bussarnas passagerarkabiner. Till vänster resultat från mätning vid vagnsände och till höger resultat från mätning i kabinens mitt.*



Figur 20. *Box plottar över PM10-halter i bussarnas passagerarkabiner. Till vänster resultat från mätning vid vagnsände och till höger resultat från mätning i kabinens mitt.*



Figur 21. *Box plottar över PM2.5-halter i båtarnas passagerarkabiner. Till vänster resultat från mätning vid vagnsände och till höger resultat från mätning i kabinens mitt.*



Figur 22. *Box plottar över PM10-halter i båtarnas passagerarkabiner. Till vänster resultat från mätning vid vagnsände och till höger resultat från mätning i kabinens mitt.*

4. Diskussion

Mätresultaten från båda delstudierna visar att de högsta halterna av PM- och sotkoncentrationer uppmättes i tunnelbanans vagnar, se Figurerna 2–7. Att de högsta halterna av PM2.5 och PM10 uppmättes i tunnelbanans vagnar är i linje med resultat från en tidigare studie i Lissabon [12]. Tillskillnad mot Stockholm, så var dock sotkoncentrationerna i Lissabons tunnelbanekabiner lägre jämfört med dess busskabiner. Skillnad i fordonsflotta mellan Stockholm och Lissabon kan påverka här både för bussresa ovanjord såväl som vid tunnelbaneresa underjord. Dock bör det noteras att den sot-mätare som användes för att mäta sotkoncentrationer är konstruerad att mäta sot från

förbränningsprocesser. En tidigare studie har visat att man kan relatera ökande PM2.5-halter till ökande sot-halter vid nötning av vägfordons mekaniska bromsar [15]. Tunnelbanetågens blockbromsbelägg har en liknande tillverkningsprocess som vägfordons skivbromsbelägg. Här behövs vidare forskning för att klargöra källorna till de höga halterna av sot som uppmättes i tunnelbanevagnar.

Båda delstudierna som presenterades här visar också att det högsta PM- och sothalterna uppmättes i de otäta tunnelbanevagnarna av typ CX, se Figurerna 2–7. Liknade resultat har tidigare uppvisas i studier i Atens tunnelbana [11] där otäta vagnar uppvisade signifikanta högre PM-koncentrationer jämfört med nya vagnar med täta passagerarkabiner. Det bör betonas att CX-vagnarna håller på att avvecklas från Stockholm tunnelbana och att de då ersätts med C30-vagnar. När mätningarna i denna studie genomfördes, var andelen CX-vagnar på tunnelbanans röda linje 20 % (september till november 2020) respektive 10 % (juni 2022). Vid denna rapports skrivande i mars 2023 är andelen CX-vagnar ca 1 % på tunnelbanans röda linje. För Trafikverket finns en liknande situation med otäta passagerarvagnar med öppningsbara fönster. Det är de lokdrivna fjärrtåg (RC-lok) som stannar vid Arlanda C, som är en underjordisk tågplattform. Mätresultat av PM10-halter från Arlanda C finns rapporterade i Gustafsson m.fl. [16] och dygnmedelvärdet uppmättes till 240 µg/m^3 i dygnsmedelvärde. Detta kan jämföras med inriktningsmål om 240 µg/m^3 (dygnsmedelvärde) som den utbyggda tunnelbanan i Stockholm har för publika utrymmen.

En annan skillnad mot vid Trafikverkets anläggningar är väntetiden för passagerare. För ett pendeltåg på Arlanda C kan det vara 20 minuter mellan varje pendeltåg och vid tunnelbanetrafik kan det vara tre minuter mellan tunnelbanetågen. Olofsson och Tu [17] använde som ett alternativt resonemang, exponeringen som en resenär utsätts för på en underjordisk tågplattform.

Exponering *Exp* [µg] är den totala massan av PM10 partiklar, som en passagerare kan andas in när man väntar på en underjordisk tågplattform i en timme. Ekvation (1) visar beräkningsmetoden för *Exp*.

$$Exp = C \cdot V \cdot T \tag{1}$$

C [µg/m^3] är masskoncentrationen av PM10 i ett specifikt tidsintervall (en timme i denna studie). Det finns ett linjärt förhållande mellan *C* och motsvarande tågfrekvens *n* [#/h] som visas i ekvation (2). *K* [µg*h/m^3] är tågfrekvensfaktorn (lutningskoefficient) och *m* [µg/m^3] är skärningspunkten med y-axeln. Tåg i båda riktningarna beaktas i *n*-värdena.

$$C = k \cdot n + m \tag{2}$$

Andningshastigheten *V* [m^3/h] är den luftvolym en passagerare andas per timme. I denna studie ansätts *V* till värdet 1 m^3/h som ett jämförelsetal. Detta innebär att man inte skall fästa avseende på nivån på värdena av exponeringen, utan i stället fokusera på hur exponeringen påverkas av antalet tågekvivalenter.

T [h] är den genomsnittliga väntetiden för passagerare, som har inverskorrelation med motsvarande tågfrekvens *n*. Eftersom varje passagerare bara väntar på tågen i antingen en riktning, behöver förhållandet mellan *T* och *n* fördubblas. Beräkningen av *T* visas i ekvation (3).

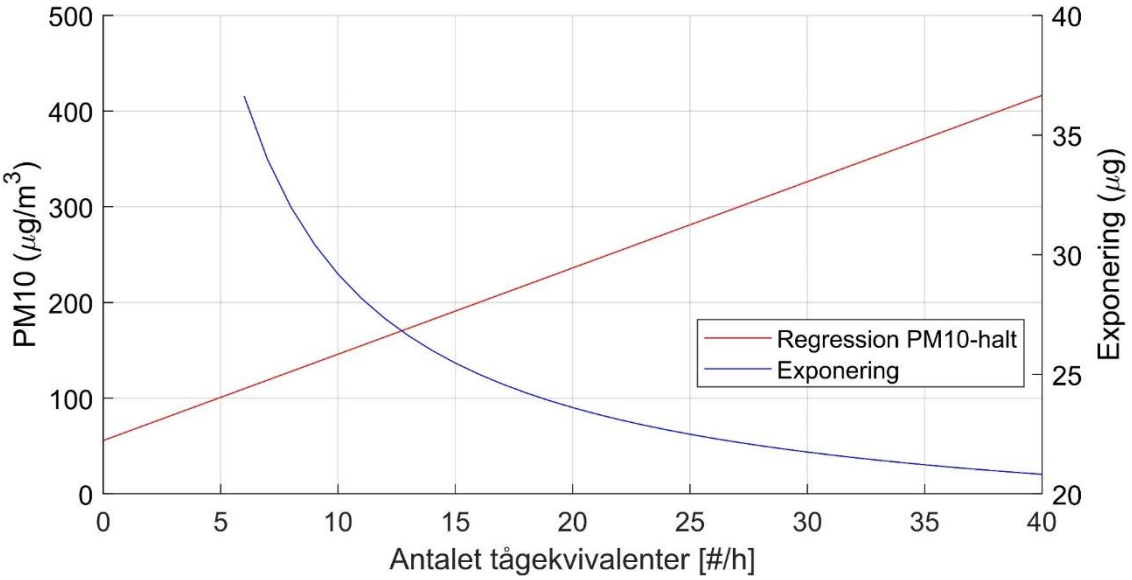
$$T = \frac{2}{n} \tag{3}$$

Därefter kan ekvation (1) uttryckas som ekvation (4).

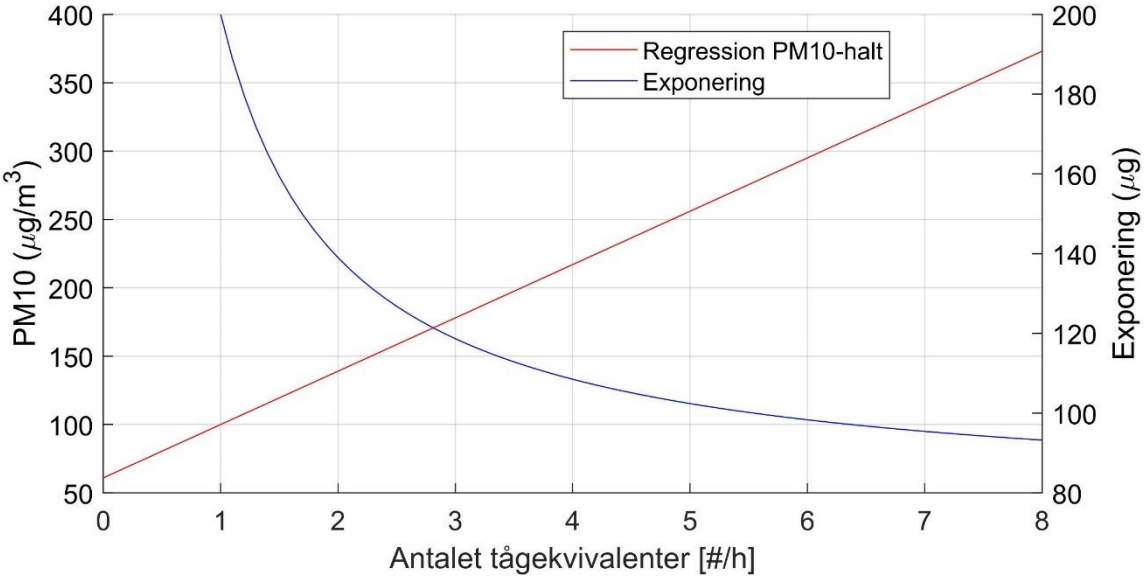
$$Exp = \frac{2m}{n} + 2k \tag{4}$$

Resultat av en beräkning av exponering på Stockholms tunnelbana, T-centralen (blå linje), mot antalet tågekvivalenter redovisas i Figur 23 [17]. Dataunderlaget för analysen redovisas i Tabell 2. Resultaten visar att om man halverar trafiken på T-centralen för tunnelbanans blå linje, för att uppfylla ett inriktningsmål om 240 µg/m^3, så kommer exponeringen av partikelmassa som väntande passagerare utsätts för att öka. Notera att denna ökning är olinjär och kommer enligt modellen att öka kraftigare ju mer väntetiden utökas. Samma analys genomfördes också för Arlanda C baserat på underlag presenterade i [16], se Tabell 2. Resultaten redovisas i Figurer 24. En med tunnelbanan jämförelsevis ökad exponering av partikelmassa för passagerare som väntar på ett tåg på Arlanda C kan noteras.

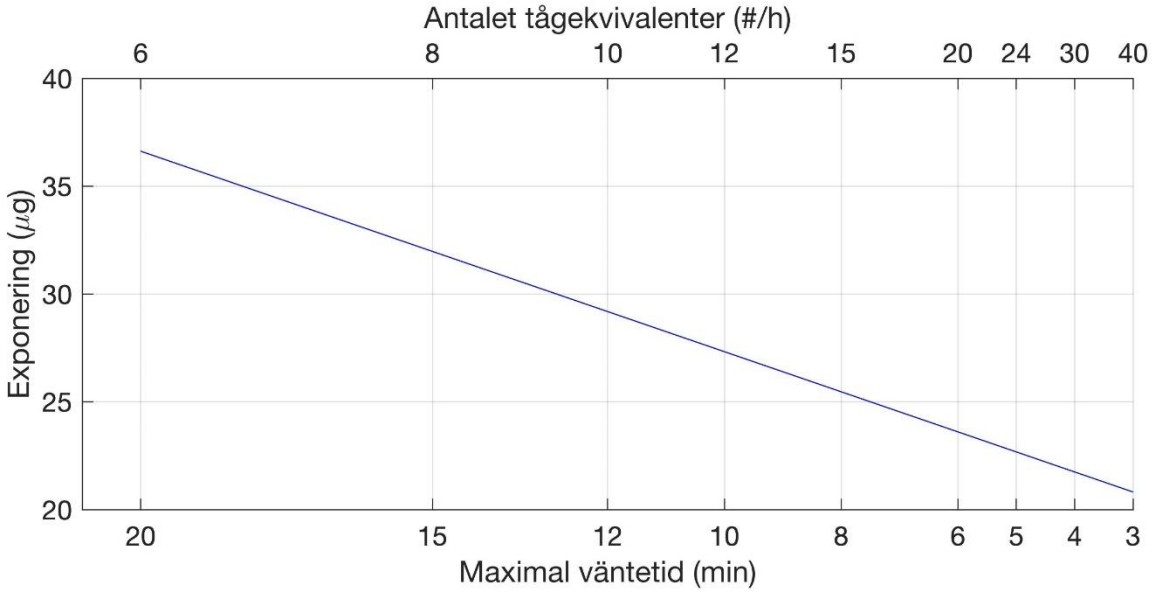
Modellresonemanget ovan, visar på att en reducering av tågtrafiken för att uppfylla ett riktvärde leder till en ökad exponering på grund av ökad väntetid på en underjordisk tågplattform. Detta kan verka motstridigt på folkhälsan. Modellresonemanget visar också på en risk med väsentligt högre exponering vid väntan på underjordiska tågplattformar med färre antal tåg per timme. Detta tydliggörs om man jämför exponeringsberäkningen mot maximal väntetid på tågplattform so redovisas i Figurerna 25 och 26 för T-centralens blå linje och Arlanda C.



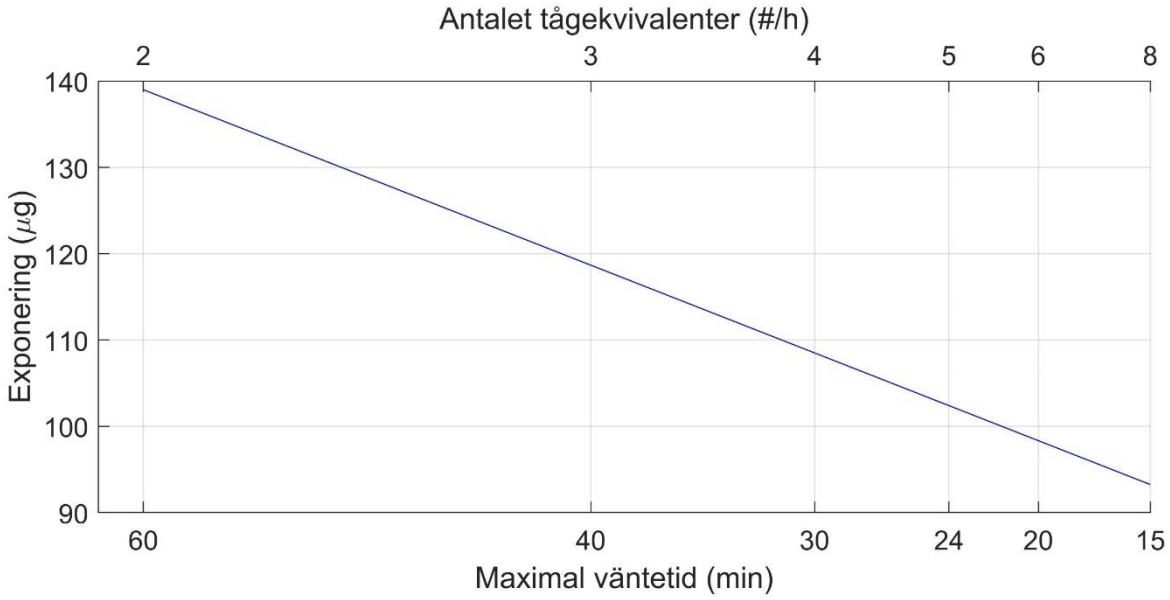
Figur 23. *PM10-halt (timmedelvärde) och Exponering för T-centralen blå linje mot antalet tågekvivalenter per timme.*



Figur 24. *PM10-halt (timmedelvärde) och Exponering för Arlanda C mot antalet tågekvivalenter per timme.*



Figur 26. *Exponering mot Maximal väntetid för T-centralen blå linje.*



Figur 27. *Exponering mot Maximal väntetid för Arlanda C.*

Tabell 2. *Dataunderlag för exponeringsberäkning.*

Underjordisk plattform	m	k	Referens
T-centralen blå linje	56	9	[16]
Arlanda C	61	39	[17]

Resultaten för tunnelbanemätningarna visar också att PM- och sothalterna ökar när tunnelbanetågen går in i spårtunnlarna och att en viss ökning av halterna kan noteras mot tunneldjup, detta är i linje med tidigare resultat från Stockholms tunnelbana [5]. Här påverkar förmodligen också spårkvaliteten då på delar av den uppmätta sträckan kunde konstanta halter uppmätas mellan KTH och Bergshamra, där spåren är förhållandevis raka. Detta resultat kan jämföras med de varierande halterna som uppmättes på spåren mellan T-centralen och Stadion, som har mer snäva kurvradier, se Figurerna 8–10. För buss- och båtresenären var PM- och sothalterna förhållandevis konstanta under resan, se Figurerna 11–16.

5. Slutsatser

Mätresultaten från denna studie visar följande resultat:

Att pendlare som reser med båt eller buss har en luftkvalitet (timmedelvärde) som understiger WHO:s rekommenderade dygnsmedelvärden för PM2.5- och PM10-halter.

Att pendlare som reser i tunnelbanevagn har en luftkvalitet (timmedelvärde) som överstiger WHO:s rekommenderade dygnsmedelvärden för PM2.5- och PM10-halter när tågen trafikerade spårtunnlar.

För äldre otäta tunnelbanevagnar uppmättes de högsta PM2.5 och PM10-halterna. Även de uppmätta sothalterna var de högsta vid resa i de äldre otäta tunnelbanevagnarna.

Vid promenad och cykling uppmättes PM2.5-, PM10- och sothalter som var i paritet de som uppmättes för bussresenärer.

Mätresultaten visade också på små skillnader i luftkvalitet på var i passagerarutrymmena man placerade sig.

En litteraturgenomgång visar på att plattformsavskiljande dörrar som metod att förbättra luftkvaliteten för tunnelbaneresenärer, har i en del fall haft motsatt effekt.

6. Referenser

[1] Förordning om miljökvalitetsnormer för utomhusluft, Luftkvalitetsförordning (2010:477). Miljödepartementet 2010, SFS 2010:477

[2] Miljökvalitetmål: http://www.miljomal.se/

[3] WHO:s riktlinje för utomhusluft https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/ambient-(outdoor)-air-quality-and-health

[4] Janssen, N.A., Gerlofs-Nijland, M.E., Lanki, T., Salonen, R.O., 2012. Health effects of black carbon. World Helth Organisation.

[5] Stenbeck J. mfl, PM10 i tunnelbanevagnar i Stockholm, WSP rapport 2006-05-22.

[6] Cha Y., Tu M., Elmgren M., Silvergren S., Olofsson, U,. Factors affecting the exposure of passengers, service staff and train drivers inside trains to airborne particles, Environmental Research, vol 166 (2018) 16-24.

[7] Son, Y.-S., Jeon, J.-S., Lee, H.J., Ryu, I.-C., Kim, J.-C., 2014. Installation of platform screen doors and their impact on indoor air quality: Seoul subway trains. Journal of the Air & Waste Management Association 64 (9), 1054–1061

[8] Lee, E.-S., Lee, T.-J., Park, M.-B., Kim, D.P.S.-D.K.D.-S., 2016. The size-oriented particulate mass ratios and their characteristics on the Seoul metropolitan subway lines. Asian J. Atmos. Environ. 10 (4), 217–225.

[9] Kappelt N.,.et al., Particulate air pollution in the Copenhagen metro part 1: Mass concentrations and ventilation, Environment International, Volume 171, January 2023, 107621

[10] Barmparesos N., Assimakopoulos V.D., Assimakopoulos M.N., Tsairidi E. Particulate matter levels and comfort conditions in the trains and platforms of the athens underground metro, AIMS Environmental Science, Volume 3, Issue 2, Pages 199 – 219, 2016

[11] Querol, X., Moreno, T., Karanasiou, A., Reche, C., Alastuey, A., Viana, M., Font, O., Gil, J., De Miguel, E., Capdevila, M., 2012. Variability of levels and composition of PM 10 and PM 2.5 in the Barcelona metro system. Atmos. Chem. Phys. 12 (11), 5055–5076

[12] Correia C. et al, Particle exposure and inhaled dose while commuting in Lisbon, Environmental Pollution vol 257, 113547 , 2020.

[13] SLB-analys hemsida, https://www.slb.nu/slbanalys/historiska-data-luft/

[14] Tu M. and Olofsson U., PM levels on an underground metro platform: A study of the train, passenger flow, urban background, ventilation, and night maintenance effects, Atmospheric Environment: X, (2021) vol 12, 100134

[15] Yezhe L. and Olofsson U., On black carbon emission from automotive disc brakes, Journal of Aerosol Science (2020) vol.148,105610

[16] Gustafsson M et al., Inhalable railroad particles at ground level and subterranean stations – Physical and chemical properties and relation to train traffic, Transportation Research Part D: Transport and Environment, Volume 17, Issue 3, Pages 277 – 285. May 2012.

[17] Olofsson U och Tu M., Modellering av luftburna partiklar i tunnelbanan, Teknisk rapport KTH, TRITA-ITM-RP 2022:1.

Appendix A

Mätplan för båtpendling

Route

Between Ropsten and Nybroplan (No. 80) 1 hour

Experimenter

Nisha Singh, Ahsan Kadevalappil Ajilan

Test campaign

• Start the measurement at the Ropsten boat station. Stay at the station for 10 min.

• Get on the 2nd level of the boat. One experimenter stays at the end of the boat, and the other one stays in the middle of the boat with the Particle counter and BC device.

• Get out of the boat at Nybroplan station. Stay at the station for 10 min.

• Travel one time per day.

Mätplan för busspendling

Route

Between Odenplan and Gullmarsplan (No. 4) 30 min

Experimenter

Nisha Singh, Ahsan Kadevalappil Ajilan

Test campaign

• Start the measurement at the Odenplan bus stop. Stay at the stop for 10 min.

• Get on the bus. One experimenter stays at the end of the bus and the other one stays in the middle of the bus with the Particle counter and BC device.

• Get out of the bus at Gullmarsplan. Stay at the stop for 10 min.

• Get on the bus back to Odenplan. Stay at the stop for 10 min.

• Repeat this process twice a day. One in the morning, the other one in the afternoon.

Mätplan tunnelbanependling

Route

Between Mörby centrum and Telefonplan

Experimenter

Nisha Singh, Ahsan Kadevalappil Ajilan

Test campaign

• Start the measurement at the Mörby centrum station platform. Stay on the platform for 10 min.

• Get on the train. One experimenter stays close to the door and the other one stays in the middle of the compartment with the Particle counter and BC device.

• Get out of the train at Telefonplan. Stay on the platform for 10 min.

• Get on the train back to Mörby centrum. Stay on the platform for 10 min.

• Repeat this process twice a day. One in the morning, the other one in the afternoon.