



Metroselskabet I/S Cityringen metrolinje Måling af PM_{2,5} på perronafsnit

**Akkrediteret rapport nr. 123-23055 A
Målinger udført i perioden august til oktober 2023
Projektleder: Thomas Bjerring Kristensen**

Underskriftsberettiget

Prøvningsrapporten er kun gyldig med signatur fra FORCE Technology. Rapporten forefindes som original i FORCE Technologys database og sendes som elektronisk duplikat til kunden. Den hos FORCE Technology lagrede original har forrang som dokumentation for rapportens indhold og gyldighed. Prøvningsrapporten må kun gengives i uddrag med tilladelse fra FORCE Technology.

GTS

ADVANCED
TECHNOLOGY GROUP

Kontakt:
Clean Air Technologies
Projektleder Thomas Bjerring Kristensen
Direkte tlf.
Mobil: 42 62 72 09
E-mail: tbkr@forcetechnology.com

FORCE Technology
Park Allé 345
2605 Brøndby, Danmark
+45 43 25 00 00
+45 43 25 00 10
info@forcetechnology.dk
www.forcetechnology.com



Resumé

Målinger af luftbåren partikulær masse ($PM_{2,5}$) er blevet udført på Nuuks Plads metroperron i september-oktober, 2023. Formålet var at undersøge hvilke niveauer af $PM_{2,5}$, som passagerer kan møde på metroperroner. Indledende screeninger med håndholdt måleudstyr på seks M3 metroperroner indikerede, at de højeste niveauer af $PM_{2,5}$ forefandt på Nuuks Plads. Der blev opnået 29 akkrediterede måleresultater med den gravimetriske referencemetode, hvor hver prøve blev opsamlet over 6 timer. Resultaterne indikerer betydelige døgnvariationer i $PM_{2,5}$, hvor de laveste niveauer typisk observeredes i nattetimerne, hvor der er færrest togafgange. Målte døgnmiddelværdier af $PM_{2,5}$ lå i intervallet fra 86 til 186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En længere måleserie af $PM_{2,5}$ på næsten 30 døgn blev opnået med en ikke-akkrediteret optisk målemetode ved anvendelse af et Dusttrak instrument. Optisk målte niveauer af $PM_{2,5}$ blev lineært korrigeret for optimal overensstemmelse med referencemetoden. Målingerne viser en markant variation i $PM_{2,5}$ henover et typisk døgn. Typiske niveauer af $PM_{2,5}$ på 140-180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ observeredes på hverdage i myldretiden, hvor der forekommer flest togafgange i timen. Omvendt observeredes på hverdagsnætter typiske niveauer af $PM_{2,5}$ omkring 60-90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket falder sammen med færrest togafgange i timen. Under normale driftsforhold vil koncentrationer af $PM_{2,5}$ typisk være lavere i dagtimerne på lør- og søndage i forhold til hverdage. Ydermere forventes det at niveauerne af $PM_{2,5}$ typisk har været lavere på andre metroperroner på M3-linjen end det, der blev observeret på Nuuks Plads under måleperioden.



Indholdsfortegnelse

Resumé	2
1 Indledning	4
1.1 Formål	5
2 Resultater	5
2.1 Resultatoversigt, akkrediterede målinger af PM _{2,5}	5
2.2 Resultatoversigt, ikke akkrediterede målinger af PM _{2,5}	6
2.3 Kommentarer til resultaterne	7
3 Beskrivelse af målestedet	8
4 Målingernes udførelse	8
4.1 Måleforhold og målemetoder	8
5 Konklusion	9
Bilag A Målemetoder og usikkerheder	10
Bilag B Tidsserie for PM _{2,5} målt med Dusttrak på Nuuks Plads	12

1 Indledning

Der ønskedes udført akkrediterede målinger af døgnmiddel $PM_{2,5}$ med referencemetoden (filtervejningsmetode) henover en måneds tid, så vidt muligt på den metroperron med de højeste niveauer af $PM_{2,5}$. Supplerende ikke-akkrediterede målinger af $PM_{2,5}$ med det mindre Dusttrak instrument ønskedes anvendt til screeningsmålinger på flere perroner, samt anvendt parallelt med referencemetoden på Nuuks Plads for bestemmelse af en korrektionsfaktor til $PM_{2,5}$ målt med Dusttrak.

FORCE Technology har i september og oktober 2023 udført målinger af luftbåren partikulær masse for partikler med diametre op til $2,5 \mu m$ ($PM_{2,5}$) på Nuuks Plads metroperron i København. Perronen på Nuuks Plads blev valgt som målelokation med forventning om, at de højeste niveauer af $PM_{2,5}$ forefandt der blandt Cityringens (M3s) perroner. Forventningen var baseret på erfaringer fra tidligere studier samt indledende screeningsmålinger på seks metroperroner på M3.

Screeningsmålingerne blev udført 9.+10. august, 2023 på Aksel Møllers Have, Nuuks Plads, Nørrebro Runddel, Nørrebro, Skjolds Plads og Vibenshus Runddel. De stationer ansås for de mest sandsynlige kandidater til de højeste niveauer af $PM_{2,5}$. Tidligere studier har vist at de højeste niveauer af $PM_{2,5}$ typisk forefindes i tunnelafsnit fjernt beliggende fra tunnelåbningerne, hvor metroen overgår til højbane. Alle screeningsmålingerne blev udført på hverdage i tidsrummet 14-18, hvor togtrafikken på M3-linjen er mest intensiv med 40 togafgange i timen (se Tabel 1)

Tabel 1: Hyppighed af togafgange ved normaldrift af M3-metrolinjen (kilde: www.m.dk).

Tidsrum	Tidsrum ml. togafgange [minutter]	Estimeret antal tog/time
Hverdage myldretid 07-09, 14-18	3 (begge retninger)	40
Hverdage udenfor myldretid samt weekend	4-5 (begge retninger)	27
Nat efter fre.-lør. 01-07	12 (begge retninger)	10
Nat efter søn.-torsdag 0-05	6 (kun en retning)	10

Rekvirent: Metroselskabet I/S ved Michael Friedrich Bachmann

Målingerne er udført af: Thomas Bjerring Kristensen

Rapporten er udarbejdet af: Thomas Bjerring Kristensen

Måleparametre og målingernes varighed fremgår af resultatoversigten i kapitel 2.1.

Prøveudtagning er gennemført i overensstemmelse med FORCE Technologys akkreditering nr. 51 fra DANAK. Analyse er gennemført i overensstemmelse med FORCE Technologys akkreditering nr. 8 fra DANAK.

Følgende er ikke omfattet af akkrediteringen:

- Alle målinger af $PM_{2,5}$ baseret på Dusttrak instrument
- Samtlige diskussioner, vurderinger samt formuleringer, der har karakter af rådgivning

Resultatet af målingerne gælder for den undersøgte måleperiode.

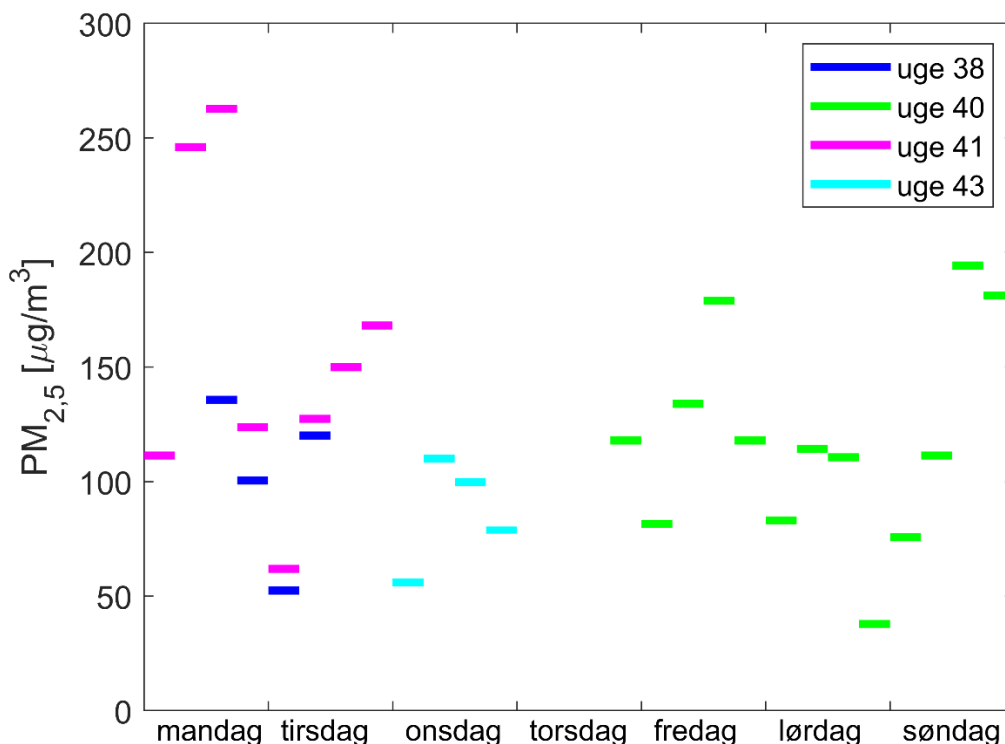
1.1 Formål

Formålet med studiet var at opnå et robust billede af et øvre koncentrationsniveau af $PM_{2,5}$ som passagerer kan møde på perronafsnit på metrolinjen M3. Referencemetodemålinger af $PM_{2,5}$ ønskedes anvendt til formålet. Der er i Danmark ikke grænseværdier for $PM_{2,5}$ relateret til passagerers ophold på underjordiske perronafsnit, så det var ikke muligt at sammenligne måleresultaterne med nogen gældende grænseværdi.

2 Resultater

2.1 Resultatoversigt, akkrediterede målinger af $PM_{2,5}$

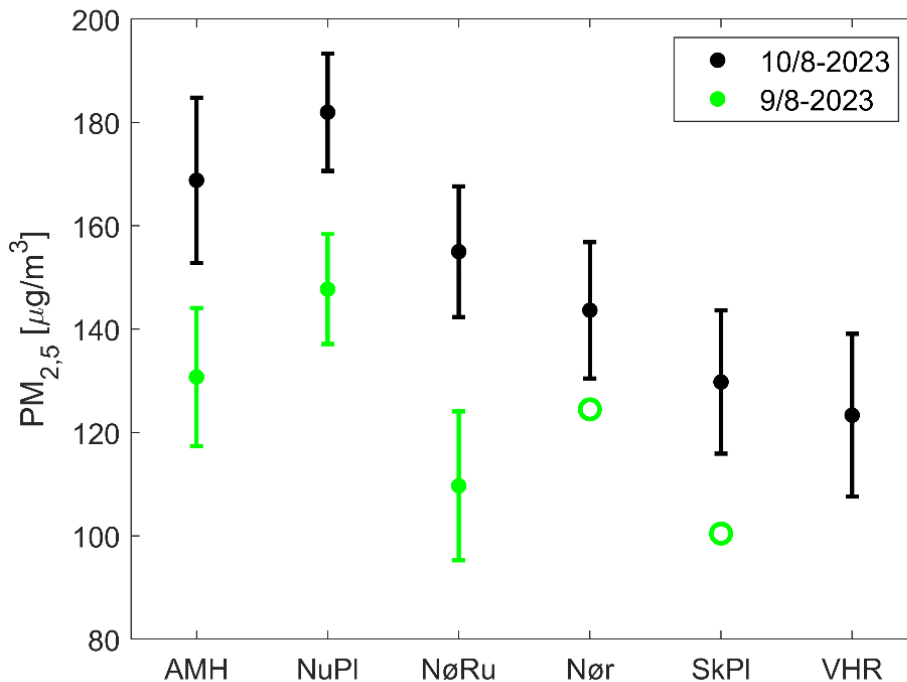
Det blev under målekampagnen erfaret, at jævnlig udskiftning/rengøring af impaktorplade var nødvendig med hensyn til referencemetodemålingerne, da målingerne ellers ville medføre for lave værdier (se Bilag A for nærmere detaljer). Der præsenteres i nærværende rapport kun de referencemetodemålinger af $PM_{2,5}$ som blev opnået op til 30 timer efter skifte af impaktorplade, da disse anses for retvisende. Målingerne af $PM_{2,5}$ udført med referencemetoden repræsenterer seks-timers perioder i tidsrummene 0-6, 6-12, 12-18 eller 18-24. Resultaterne deraf er vist i Figur 1. Der forekommer flere gab i måleserien, hvilke primært skyldes manglende mulighed for dagligt skifte af impaktorplade over hele måleperioden. Døgnmiddelværdier fra 86 til $186 \mu\text{g}/\text{m}^3$ blev målt med referencemetoden.



Figur 1. Måleresultater for $PM_{2,5}$ opnået med referencemetoden på Nuuks Plads. Alle resultater er opnået via sampling over seks timer i tidsrummene 0-6, 6-12, 12-18 eller 18-24 i løbet af et givent døgn.

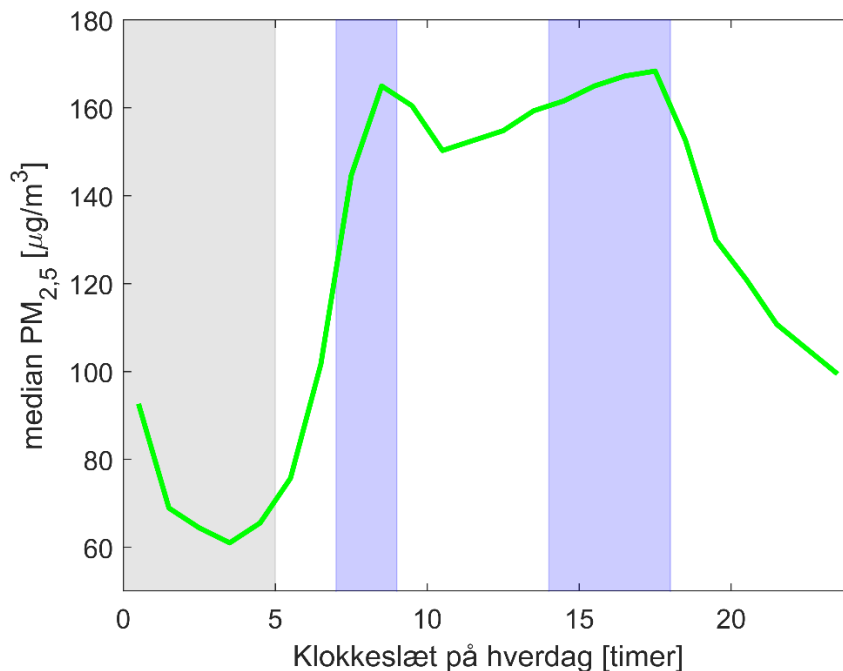
2.2 Resultatoversigt, ikke akkrediterede målinger af PM_{2,5}

Der blev d. 9. og 10. august udført screeningsmålinger af PM_{2,5} med Dustrak på seks M3-perroner i tidsrummet 14-18 (myldretid). Resultaterne er vist i Figur 2.



Figur 2. Dustrak screeningsmålinger af PM_{2,5} udført i tidsrummet 14-18 d. 9. eller d. 10. august, 2023 på M3-perronerne: Aksel Møllers Have (AMH), Nuuks Plads (NuPI), Nørrebros Runddel (NØRu), Nørrebro (Nør), Skjolds Plads (SkPI) og Vibenshus Runddel (VHR). De udfyldte punkter repræsenterer gennemsnitlige målinger foretaget over mindst 25 minutter, mens de vertikale linjer indikerer spændet plus/minus en standardafvigelse. De to grønne cirkler repræsenterer et gennemsnit af målinger foretaget over ca. 2-3 minutter. En korrektionsfaktor på 1,14 er blevet anvendt på de viste data.

Der blev udført længerevarende målinger af PM_{2,5} med Dustrak på Nuuks Plads i perioderne 18-22/9 samt 4-30/10. Medianværdierne af PM_{2,5} på timebasis på hverdage er vist i Figur 3.



Figur 3. Medianværdier for PM_{2,5} på timebasis på hverdage målt med Dusttrak på Nuuks Plads i perioderne 18-22/9 og 4-30/10. Tidsrummet med laveste omfang af togafgange er skraveret gråt, mens tidsrum med højeste antal togafgange er skraveret blå ud fra informationen i Tabel 1. En korrektionsfaktor på 1,14 er blevet anvendt på de viste data.

2.3 Kommentarer til resultaterne

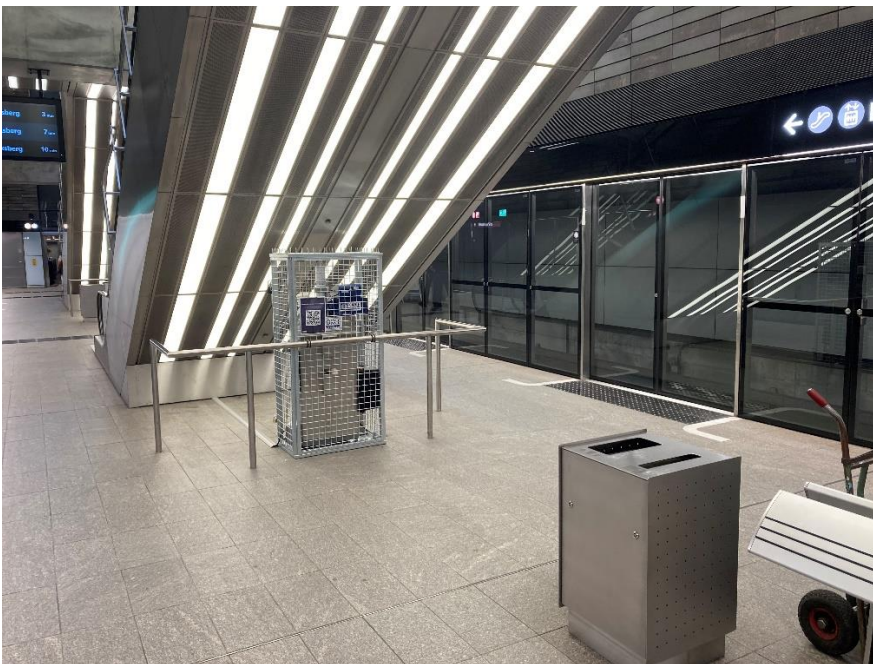
Nuuk Plads blev udvalgt som målelokation, da de højeste niveauer af PM_{2,5} blev observeret på den perron under screeningsmålingerne d. 9. og 10. august (se Figur 2). Baseret på screeningsmålingerne samt tidligere udførte studier forekommer det overvejende sandsynligt, at lavere niveauer af PM_{2,5} typisk forekommer på andre M3-perroner end Nuuk Plads under normale driftsforhold.

Resultaterne fra referencemetoden (se Figur 1) viser at niveauet af PM_{2,5} gennemgående forekommer højere i tidsrummet fra 06-18 end i aften- (18-24) og nattetimerne (0-06). Der ses en betydelig spredning i døgnmiddelværdier af PM_{2,5} fra 86 til 186 µg/m³. Så det er ikke muligt entydigt at slutte hvad typiske døgnmiddelværdier af PM_{2,5} er på den baggrund.

Der blev udført målinger af PM_{2,5} med Dusttrak på Nuuk Plads over næsten 30 døgn. Medianværdierne for PM_{2,5} på timebasis for hverdage (Figur 3) viser, at der er en markant døgnlig variabilitet og en tydelig sammenhæng mellem antallet af togafgange og niveauet af PM_{2,5}. I myldretiden observeredes typisk de højeste niveauer af PM_{2,5} (ofte omkring 140-180 µg/m³), men den gennemsnitlige opholdstid for ventende passagerer på perronen må i det tidsrum også antages at være relativt kort og i størrelsesordenen 1-2 minutter (se Tabel 1). På hverdagsnætter i tidsrummet 0-05 målt typiske niveauer af PM_{2,5} omkring 60-90 µg/m³, hvilket falder sammen med færrest togafgange i timen.

3 Beskrivelse af målestedet

Måleinstrumenterne blev placeret på areal under rulletrappe på Nuuks Plads (se Figur 4). Måleinstrumenterne blev afskærmet med et groft gitter af rustfrit stål således at inlet og elektronik ikke umiddelbart kunne berøres af passagerer. Den afskærmende gitterboks var fastgjort til gelænderet således at opstillingen ikke nemt kunne skubbes ud af position. Inlet til filtersamplers var i ca. 160 cm højde over gulvniveau, mens luftindtaget til Dusttraken var i ca. 140 cm højde over gulvniveau. Ventilationssystemet er fokuseret nær skydedørene ud mod skinnerterræn, så målelokationen blev ikke direkte eksponeret til den mest intense luftudskiftning. Ventende passagerer opholdt sig ofte i området meget nær måleopstillingen. Det vurderes dermed, at målingerne har god overensstemmelse med hvad ventende passagerer kan forventes at møde af PM_{2,5} niveau på perronafsnit. Samtlige screeningsmålinger med Dusttrak er udført på en tilsvarende position under rulletrappe på forskellige perroner.



Figur 4. Placering af måleinstrumenter på Nuuks Plads på areal under rulletrappe. Måleinstrumenterne var afskærmet med et metalbur for at forhindre folk i direkte berøring af elektronik, måleinstrumenter og luftindtag.

Oplysninger om forholdene på målestedet er ikke omfattet af akkreditering nr. 51 og 8.

4 Målingernes udførelse

4.1 Måleforhold og målemetoder

Målingerne af PM_{2,5} er alle udført i en periode, hvor der ikke er udført samtidig skinneslibning på M3-linjen. De anvendte målemetoder og deres tilhørende usikkerhed er beskrevet i Bilag A.

Afvielser fra akkrediterede metoder:

Det blev i løbet af måleperioden erfaret at jævnlig skifte af impaktorplade var nødvendig for måling af PM_{2,5} med den gravimetriske referencemetode. Dette har medført en kortere periode med resultater end forventet, men det anses ikke for en afvigelse fra metoden.

5 Konklusion

Indledende screeningsmålinger af $PM_{2,5}$ med Dusttrak på seks metroperroner på Cityringen (M3) indikerede at de højeste $PM_{2,5}$ niveauer fandtes på Nuuks Plads. Disse screeningsmålinger blev udført med en ikke-akkrediteret målemetode. Screeningsresultaterne medførte at Nuuks Plads blev udvalgt som målelokation for en længere måleserie af $PM_{2,5}$, da det kunne antages at $PM_{2,5}$ niveauer på andre metroperroner på Cityringen sandsynligvis ville være lavere. De længerevarende målinger af $PM_{2,5}$ blev udført på Nuuks Plads i september og oktober, 2023.

Der blev opnået 29 $PM_{2,5}$ måleresultater med den akkrediterede gravimetriske referencemetode, hvor hver prøve repræsenterer 6 timer. Resultaterne indikerer betydelige døgnvariationer i $PM_{2,5}$. De laveste niveauer af $PM_{2,5}$ blev typisk observeret i nattetimerne (kl. 0-06), som er den 6-timers periode med færrest togafgange. Målte døgnmiddelværdier af $PM_{2,5}$ lå i intervallet fra 86 til 186 $\mu\text{g}/\text{m}^3$.

En længere måleserie af $PM_{2,5}$ på næsten 30 døgn blev opnået på Nuuks Plads med en ikke-akkrediteret optisk målemetode (Dusttrak). Dusttrakmålingerne af $PM_{2,5}$ blev lineært korrigeret for optimal overensstemmelse med referencemetoden. Målingerne viser en markant variation i $PM_{2,5}$ henover et typisk døgn. Typiske niveauer af $PM_{2,5}$ på 140-180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ observeredes på hverdage i myldretiden, hvor der forekommer flest togafgange i timen. Omvendt observeredes på hverdagsnætter typiske niveauer af $PM_{2,5}$ omkring 60-90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket falder sammen med færrest togafgange i timen. Under normale driftsforhold vil koncentrationer af $PM_{2,5}$ være lavere i dagtimerne på lør- og søndage i forhold til hverdage, da der sædvanligvis er relativt færre togafgange i dagtimerne på lør- og søndage.

Bilag A Målemetoder og usikkerheder

Akkrediterede målinger med referencemetoden:

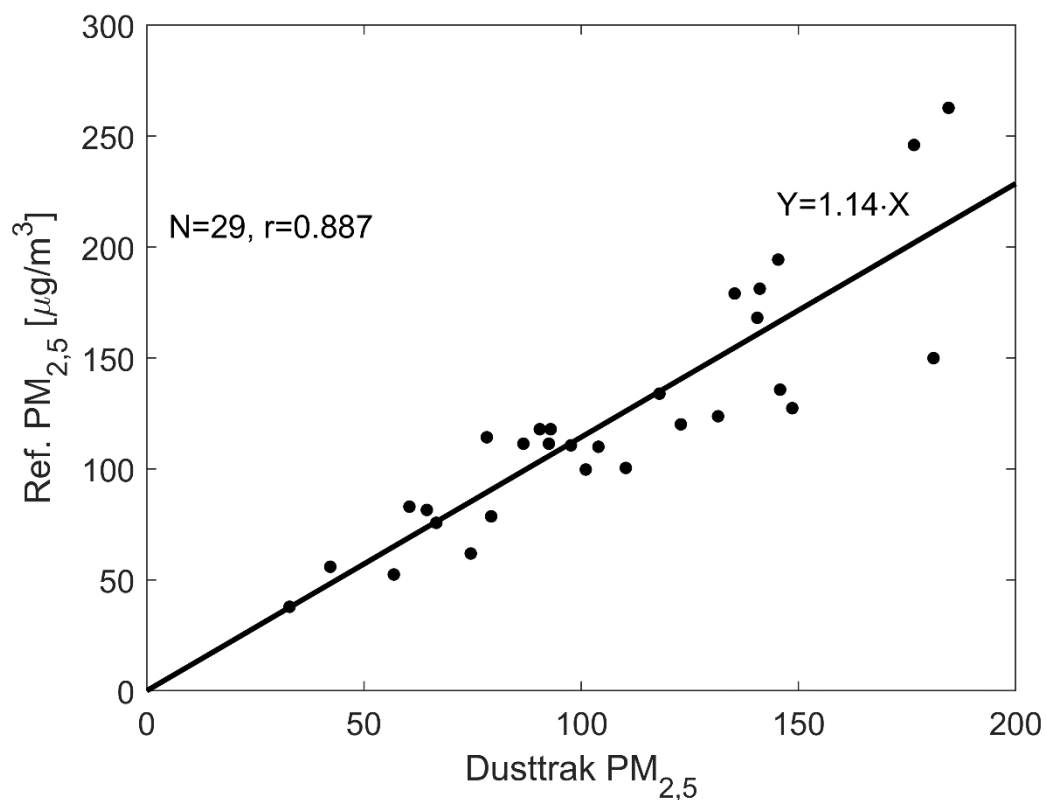
Filterprøvetagning til akkrediterede målinger af $PM_{2,5}$ blev udført med en SEQ 47/50-RV Sequential Filter Sampler fra Sven Leckel, Tyskland. Instrumentet suger luft ($2,3 \text{ m}^3/\text{time}$) gennem en forudskiller, hvor partikler med aerodynamisk diameter større end ca. $2,5 \mu\text{m}$ opsamles på en impaktorplade, hvorefter de resterende partikler opsamles på et filter. Filtrene vejes før og efter eksponering under velkontrolleret temperatur og luftfugtighed, hvorved den opsamlede $PM_{2,5}$ kan bestemmes. Blindfiltre blev isat filterholdere og placeret i samplerinstrumentet sammen med filtre til eksponering flere gange under målekampagnen, og vejning af blindfiltrene bekræftede at prøverne ikke blev eksponeret for signifikant kontamination under håndtering, transport og opbevaring. Referencemetoden er forbundet med en vis usikkerhed, som afhænger af den opsamlede partikelmasse og luftvolumen. FORCE Technology har tidligere udført sammenligningsstudier i udeluft med sampling af $PM_{2,5}$ over 24 timer, som indikerede en usikkerhed på ca. 21% på enkeltstående målinger af $PM_{2,5}$.

De præsenterede referencemetodemålinger af $PM_{2,5}$ er baseret på prøver samlet maksimalt op til 30 timer efter skifte af impaktorplade. Mindre hyppig udskiftning af impaktorplade viste sig at kunne medføre for lave målte koncentrationer af $PM_{2,5}$ efter ca. 1,5-2 døgn operation, hvilket kunne ses meget tydeligt ved sammenligning med Dusttrak-målinger. Disse erfaringer blev gjort undervejs i måleforløbet, hvilket medførte justeringer af måleprogrammet. Præsenterede resultater fra referencemetoden er alle baseret på sampling á 6 timers varighed i tidsrummene 0-6, 6-12, 12-18, 18-24, hvilket muliggjorde skifte af impaktorplade i forbindelse med automatisk filterskifte kl. 12.00 eller 18.00. Det var rent praktisk ikke muligt at skifte impaktorplade dagligt over en længere periode, hvilket har medført et begrænset antal resultater for referencemetoden. Prøvetagning over 6 timers perioder muliggjorde robusthedsstudier af resultaterne, hvilket er illustreret nedenfor via sammenligninger med Dusttrakmålinger.

Målinger ikke omfattet af akkreditering:

Målinger af $PM_{2,5}$ blev udført med Dusttrak, DRX fra TSI for at opnå tidsserier med høj tidsopløsning bl.a. i forbindelse med den indledende screening på seks metrostationer. Dusttrak blev også placeret over en længere periode på Nuuks Plads for at opnå information om $PM_{2,5}$ i tidsrum, hvor der ikke blev målt med referencemetoden. Dusttrak er baseret på et optisk måleprincip, hvor partiklernes antalskoncentration og størrelse måles, mens kendskab til partiklernes optiske egenskaber og massefylde er nødvendig for at opnå en retvisende omregning til partikelmasse. Dusttrak målinger af $PM_{2,5}$ blev periodevist udført parallelt med referencemetodemålinger af $PM_{2,5}$ på Nuuks Plads. De parallelle målinger medførte 29 målepunkter til sammenligning med referencemetoden. En korrektionsfaktor på 1,14 for $PM_{2,5}$ målt med Dusttrak blev bestemt ved lineær regression gennem origo (se Figur 5). Korrektionsfaktoren på 1,14 er blevet anvendt for alle præsenterede $PM_{2,5}$ Dusttrakmålinger. Hvis sammenligningen alene blev baseret på prøver samlet de første seks timer umiddelbart efter impaktorskifte, så ville der tilsvarende blive opnået en korrektionsfaktor på 1,15. Så der blev ikke observeret en udtalt systematisk ændring i forholdet mellem $PM_{2,5}$ målt med de to metoder, når referencemetodemålinger udført op til 30 timer efter impaktorskifte blev inkluderet i analysen.

Usikkerheden på målinger af $PM_{2,5}$ med Dusttrak afhænger af den målte koncentration, midlingstiden, hvor velbestemt korrektionsfaktoren er, og om korrektionsfaktoren kan variere over tid fx som følge af ændringer i partikelegenskaber, temperatur og/eller luftfugtighed. Temperaturen for omgivelserne på Nuuks Plads blev målt af Leckel-sampleren i perioden 18/9-25/10, og den var gennemgående at finde mellem 19 og 24°C, så temperaturforholdene var forholdsvis stabile i måleperioden. Det vurderes, at usikkerheden på de afrapporterede timemiddelværdier af $PM_{2,5}$ målt med Dusttrak ikke overstiger 25% i nærværende studie.



Figur 5. Afbildning af PM_{2,5} målt med referencemetoden versus PM_{2,5} målt parallelt med Dusttrak på Nuuks Plads. Hvert datapunkt repræsenterer et 6 timers interval. En korrektionsfaktor på 1,14 for dustrak PM_{2,5} giver den bedste overensstemmelse mellem de to målemetoder. Analysen er baseret på 29 datapunkter (N=29), og der blev fundet en lineær korrelationskoefficient (r) på 0,89.

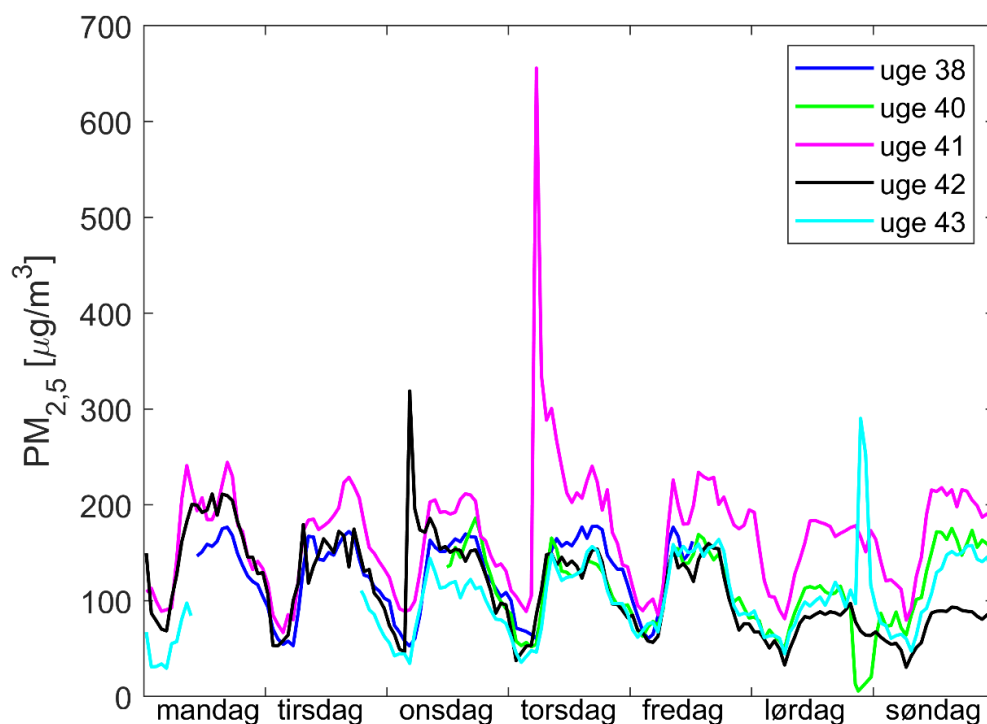
Bilag B Tidsserie for PM_{2,5} målt med Dusttrak på Nuuks Plads

I Figur 6 nedenfor er afbildet tidsserierne for timemiddelværdier af PM_{2,5} målt med Dusttrak på Nuuks Plads fordelt på forskellige ugedage.

Tidsserierne for PM_{2,5} for forskellige uger viser at der forekommer længere perioder med meget systematisk variabilitet i PM_{2,5} over forskellige hverdagsdøgn og weekender. Der ses dog også visse afvigelser fra det almindelige billede, hvilket understøtter at længerevarende måleperioder over nogle uger kan være nødvendige for at opnå et retvisende billede for de typiske niveauer af PM_{2,5} på en metroperron. Nogle enkeltstående hændelser beskrives nærmere nedenfor.

Lørdag aften i uge 40 (d. 7/10) kan ses et betydelig dyk i niveauet af PM_{2,5}, hvilket kan tilskrives at togdriften blev helt indstillet. Det kan i rådata observeres, at der sker et meget markant fald i PM_{2,5} koncentrationen i de 20 minutter umiddelbart efter togtrafikken indstilles. Den efterfølgende søndag var der ikke almindelig togdrift på M3, og der forekom flere togafgange fra Nuuks Plads end vanligt på en søndag. Der ses tendenser mod at PM_{2,5} koncentrationen er lavere i weekenden end på hverdage, hvilket kan forklares ved relativt færre togafgange i weekenden. At billedet ikke forekommer helt entydig for alle weekender kan muligvis tilskrives uregelmæssig togdrift, som det var tilfældet på ovennævnte søndag.

Der forekommer nogle eksempler på forhøjede timemiddelværdier fx torsdag morgen kl. 5-6 i uge 41 (d. 12/10), onsdag morgen kl. 4-5 i uge 42 (d. 18/10) samt lørdag aften kl. 21-23 i uge 43 (d. 28/10). Det er uklart om de episoder kan kobles til særlige forhold, der kortvarigt har påvirket niveauet af PM_{2,5}. En del vedligeholdelses- og rengøringsaktiviteter udføres i tidsrum om natten og tidlig morgen, men det er uklart om sådanne specifikke aktiviteter har været udført på Nuuks Plads på de pågældende tidspunkter. Det kan dog ikke udelukkes at Dusttrak instrumentet kan have været påvirket af særlige rystelser eller andre ydre påvirkninger, der kan have influeret målingerne i kortere tidsrum.



Figur 6. Timemiddelværdier af PM_{2,5} målt med Dusttrak på Nuuks Plads fordelt på forskellige ugedage for nærværd 30 døgns målinger. En korrektionsfaktor på 1,14 er blevet anvendt til de viste resultater.