



KVALITETSVURDERING AF AARHUS KOMMUNES NETVÆRK TIL MÅLING AF PARTIKELFORURENING

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 242

2022



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

KVALITETSVURDERING AF AARHUS KOMMUNES NETVÆRK TIL MÅLING AF PARTIKELFORURENING

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 242

2022

Thomas Ellermann
Claus Nordstrøm

Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

Serietitel og nummer: Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 242

Titel: Kvalitetsvurdering af Aarhus Kommunes netværk til måling af partikelforurening

Forfattere: Thomas Ellermann og Claus Nordstrøm
Institution: Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab

Udgiver: Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL: <http://dce.au.dk>

Udgivelsesår: Juni 2022
Redaktion afsluttet: Juni 2022

Faglig kommentering: Martin B. Sørensen
Kvalitetssikring, DCE: Vibeke Vestergaard Nielsen
Sproglig kvalitetssikring: Vibeke Vestergaard Nielsen
Finansiell støtte: Projektet er finansieret af Aarhus Kommune

Bedes citeret: Thomas Ellermann og Claus Nordstrøm. 2022. Kvalitetsvurdering af Aarhus Kommunes netværk til måling af partikelforurening. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 55 s. - Teknisk rapport nr. 242
<http://dce2.au.dk/pub/TR242.pdf>

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Sammenfatning: DCE har for Aarhus Kommune gennemført en kvalitetsvurdering af Aarhus Kommunes netværk til overvågning af partikelforureningen i Aarhus og omegn. Overvågningen foretages af firmaet Montem, som har opsat 32 luftforureningssensorer fordelt i Aarhus og omegn. Overordnet set er netværket velstruktureret med passende geografisk fordeling af målesteder og god sammensætning af typer af målesteder. Vurdering af resultaterne fra sensorerne viste, at sensorerne ikke var i stand til at give retvisende resultater for PM_{2,5} og PM₁₀ ved de koncentrationsniveauer, som er gældende i Danmark. Endvidere blev det dokumenteret, at døgnvariationen bestemt med sensorerne i store træk kunne forklares ud fra døgnvariation i relativ luftfugtighed, og at der var store afvigelser fra døgnvariation målt med DCE's referencemetode.

Emneord: Sensormålinger, PM_{2,5}, PM₁₀, målenetværk, kvalitetsvurdering, luftforureningssensorer, Aarhus, relativ luftfugtighed

Layout: Majbritt Pedersen-Ulrich
Illustrationer: Thomas Ellermann
Foto forside: Colourbox

ISBN: 978-87-7156-688-8
ISSN (elektronisk): 2244-999X

Sideantal: 55

Internetversion: Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som
<http://dce2.au.dk/pub/TR242.pdf>

Indhold

Forord	5
Sammenfatning	6
Vurdering af netværket med en fokus på vurdering af den mest hensigtsmæssige placering af PM- og NO ₂ /NO-sensorer, herunder vurdering af relevans af måling af NO	6
Vurdering af kvalitet af de målinger, som er foretaget ind til nu	8
Vurdering af de målte niveauer for PM _{2,5} og PM ₁₀	9
Opbygning af kvalitetsvurderingssystem til den løbende kontrol af sensormålingerne	11
1. Introduktion	12
2. Målemetoder og datagrundlag	14
2.1 Montems sensorer	14
2.2 DCE's målinger	14
3. Vurdering af målenetværk i Aarhus	16
3.1 Overordnet tilrettelæggelse af sensornetværket	16
3.2 Detailplacering af sensorerne	20
3.3 Relevans af måling af kvælstofmonooxid	21
4. Kvalitetsvurdering af resultater for partikelforureningen	22
4.1 Vurdering af omfanget af outliers	22
4.2 Vurdering af datadækning	23
4.3 Vurdering af de målte niveauer for PM _{2,5} og PM ₁₀	25
4.4 Reproducerbarhed og stabilitet af sensormålingerne	29
4.5 Sammenligning mellem sensormålingerne og resultaterne fra DCE's referencemålinger	34
4.6 Vurdering af den målte variation i timemiddelværdierne	37
4.7 Vurdering af den målte sæsonvariation	39
4.8 Vurdering af den målte døgnvariation	42
5. Beskrivelse af løbende kvalitetssikringssystem	50
6. Litteratur	52
Bilag 1 Beskrivelse af målesteder	53

Forord

Denne projektrapport er udarbejdet af DCE - National center for Miljø og Energi ved Aarhus Universitet på foranledning af Aarhus Kommune. Rapporten er udarbejdet i begyndelsen af 2022 og præsenterer resultaterne fra et projekt, hvor DCE har udarbejdet en kvalitetsvurdering af Aarhus Kommunes netværk til måling af partikelforurening. Projektet er finansieret af Aarhus Kommune.

Sammenfatning

Denne projektrapport er udarbejdet på basis af et projekt, som DCE - Nationalt center for Miljø og Energi har gennemført for Aarhus Kommune, der har finansieret projektet. Målet med projektet er at udarbejde en kvalitetsvurdering af Aarhus Kommunes målenetværk til måling af partikelforureningen.

Aarhus Kommunes formål med netværket er at etablere en mere detaljeret overvågning af luftforureningen i Aarhus som et supplement til de to nationale overvågningsstationer i Aarhus. Netværket er baseret på sensormålinger, da disse er relativt billige, og målestederne kan nemt flyttes, fx til monitorering af særlige indsatser/begivenheder. Herudover er det endvidere intentionen, at data fra sensorerne skal have en forskningsmæssig god kvalitet.

Netværket er etableret og drives af firmaet Montem, som også har leveret sensorerne og står for den løbende drift af netværket, herunder dataopsamling og online præsentation af data. Aktuelt er der 32 sensorer i netværket, som indtil videre udelukkende måler partikelforurening af PM_{2,5} og PM₁₀. En del af sensorerne blev opsat i december 2020, mens hovedparten af sensorerne er blevet opsat i løbet af 2021.

Projektet er opdelt i tre dele:

1. Vurdering af netværket med fokus på vurdering af den mest hensigtsmæssige placering af PM- og NO₂/NO-sensorer, herunder vurdering af relevans af måling af NO.
2. Vurdering af kvaliteten af målingerne foretaget indtil nu.
3. Opbygning af kvalitetsvurderingssystem til den løbende kontrol af sensormålingerne.

I det følgende sammenfattes resultater og konklusioner fra de tre dele.

Vurdering af netværket med en fokus på vurdering af den mest hensigtsmæssige placering af PM- og NO₂/NO-sensorer, herunder vurdering af relevans af måling af NO

Netværket består af 32 sensorer fordelt på 29 lokaliteter. På tre målesteder måles parallelt med to sensorer for at teste reproducerbarheden af målingerne.

For at skabe overblik over de mange sensorer har vi inddelt sensorernes placeringer i en række kategorier, som giver et fingerpeg om de lokale kilder til partikelforurening (Tabel 3.1). Vi har anvendt følgende kategorier, hvor tallet i parentes angiver antallet af lokaliteter med sensorer placeret i den pågældende kategori:

1. Landlig baggrund (1).
2. Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje (8).
3. Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje (3).
4. Bybaggrund i Aarhus (1).

5. Aarhus centrum, beboelse, mindre trafikerede veje (2).
6. Aarhus centrum, stærkt trafikerede veje (11).
7. Aarhus havn (3).

Overordnet set er der en hensigtsmæssig fordeling af sensorer på de forskellige lokalitetstyper, og potentielt set vil netværket kunne give god information om, hvor stor en eksponering beboere har i de forskellige dele af Aarhus og omegn. Med de valgte lokalitetstyper, vil netværket også kunne give information om kilderne til luftforureningen.

Når der måles $PM_{2,5}$ og PM_{10} er det imidlertid en udfordring, at den største andel partikler kommer fra langtransport (kilder langt væk fra), hvilket især gælder for $PM_{2,5}$. For H.C. Andersens Boulevard i København, måles for eksempel kun omkring 40% højere $PM_{2,5}$ set i forhold til målingerne i landlig baggrund ved Risø ca. 25 km vest for København. Tilsvarende vil gælde i Aarhus. Det kræver derfor relativt nøjagtigt måleudstyr for at drage fordel af de mange lokaliteter, hvor der bliver målt i netværket i Aarhus.

Hvis der skulle laves forbedringer på netværket, vil DCE foreslå, at der foretages flere målinger på grænsen mellem Aarhus Havn og den øvrige by med det mål bedre at kunne vurdere i hvilket omfang havnens aktiviteter påvirker partikelforurening i bycentrum. Endvidere kunne der med fordel udføres flere målinger i deciderede beboelsesområder i Aarhus centrum. Til gengæld kunne man skære lidt ned på antallet af målinger langs de stærkt trafikerede veje i Aarhus.

DCE har også foretaget en vurdering af opsætningen af sensorer set i forhold de mere detaljerede forhold i nærområdet omkring målestederne. Denne vurdering af foretaget med udgangspunkt i EU's kriterier for den individuelle placering af målestederne i de nære omgivelser (EC, 2008).

Generelt set overholder sensorernes placering disse krav på tilfredsstillende vis. For eksempel er alle sensorer placeret i omtrent 4 meters højde. Dog er der for nogle sensorer nogle problematiske forhold som for eksempel, at en del sidder for tæt på større trafikerede kryds, en enkelt for tæt på facaden og en midt på kørebanen. Hvis man skulle optimere netværket, så skal denne slags forhold bringes i orden. Endvidere er der en vis forskel mellem sensorernes afstand til nærmeste vejbane (kantsten). Det kunne være hensigtsmæssigt, hvis der var en mere ensartet afstand til nærmeste vejbane, hvilket navnlig er relevant for de stærkt trafikerede veje. Det skal dog også anerkendes, at dette kan være vanskeligt, da veje ofte er udformet på forskellig vis og da man er afhængig af eksisterende lysmaster eller lignende til opsætning af sensorerne.

Det er intentionen af målenetværket også skal dække måling af kvælstofdioxid, hvilket dog ikke er sat i værk endnu. I den sammenhæng har Aarhus Kommune bedt DCE om at vurdere, om det vil være relevant også at supplere med målinger af kvælstofmonooxid.

I forhold til Aarhus Kommunes netværk af luftforureningssensorer vurderer DCE, at det er mindre relevant at måle kvælstofmonooxid i sig selv. Derimod ville en samlet løsning, hvor der måles både kvælstofdioxid og den samlede mængde kvælstofoxider være fagligt relevant, og ud fra dette kunne mængden af kvælstofmonooxid beregnes. Alternativt vil kvælstofoxiderne kunne

beregnes ud fra måling af kvælstofdioxid og kvælstofmonooxid. Det vil i begge tilfælde kræve en god præcision for sensorerne.

Vurdering af kvalitet af de målinger, som er foretaget ind til nu

De første sensorer blev opsat i december 2020, mens størstedelen er opsat løbende i løbet af 2021. DCE har i januar 2022 modtaget data for PM_{2,5} og PM₁₀ fra 32 sensorer fra Montem. Det er disse data, som anvendes til kvalitetsvurderingen af sensorerne. Da der endnu ikke måles kvælstofdioxid, indgår denne del af kvalitetsvurderingen ikke.

Kvalitetsvurderingen af resultaterne for PM_{2,5} og PM₁₀ fra målenetværket er foretaget i otte trin. I det følgende præsenteres resultaterne fra disse trin.

Vurdering af omfanget af outliers

Omfanget af outliers er generelt set lavt og på et acceptabelt niveau.

Vurdering af datadækning

EU har fastlagt et krav til, at datadækningen for et år skal være højere end 85% for at sikre tilstrækkelig repræsentativitet af målingerne. Dette har dannet udgangspunkt for DCE's vurdering af datadækningen. Fem ud af de 32 sensorer lever ikke op til dette krav. Et krav om datadækning på 85% kan virke som et relativt strengt krav, hvilket dog skal ses i lyset af sensorerne som udgangspunkt kun måler 12 øjebliksværdier af PM_{2,5} og PM₁₀ per time. Reelt set er datadækningen derfor væsentligt mindre på de fem sensorer, og års-middelværdier bør derfor kun anses for indikative værdier.

Et mindre antal sensorer har problemer med antallet af øjebliksværdier målt per time. For nogle sensorer ses perioder med varierende antal øjebliksværdier per time, og nogle sensorer kører i perioder med kun tre øjebliksværdier per time, hvilket anses at være for lidt til at give pålidelige middelværdier.

Reproducerbarhed og stabilitet af sensormålingerne

På tre målesteder måler sensorerne parallelt med målere opsat tæt ved siden af, hvilket gør det muligt at bestemme reproducerbarheden af sensormålingerne. De tre målesteder er: DCE's målestation ved Banegårdsgade, DCE's målestation ved væksthuse i Botanisk Have samt målestedet på Østhavnsvej.

DCE har fra Montem modtaget dokument med angivelse af præcisionen for målingerne af PM_{2,5} og PM₁₀ (Montem, 2022), hvoraf det fremgår, at præcisionen ligger på $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ved koncentrationer af PM_{2,5} mellem 0 og $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. For PM₁₀ ligger præcisionen på $\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ved koncentrationer mellem 0 og $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Dækningsgrad fremgår ikke af dokumentet, men der tages udgangspunkt i, at præcisionen er angivet ved en dækningsgrad på 2 svarende til et konfidensinterval på 95%.

For de to sensorer på Banegårdsgade beregnes præcisionen til $\pm 7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{2,5} og $\pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM₁₀, hvilket overholder specifikationerne. For de to sensorer ved væksthuse i Botanisk Have ligger præcisionen på $\pm 4\%$ for

PM_{2,5} og PM₁₀, hvilket også er fint set i forhold til specifikationer. Ved Østhavnsvej er der meget ringe overensstemmelse mellem målingerne, og det vurderes, at der må være opstået en fejl på den ene sensor.

Ved to ud af tre parallelmålinger ses præcision i overensstemmelse med specifikationer, mens der ved Østhavnsvej var en uacceptabel stor forskel i parallelmålingerne. Dette peger på, at der er visse problemer med stabiliteten af sensorerne, hvilket må være årsag til de dårlige resultater ved Østhavnsvej.

Endvidere skal det bemærkes, at den angivne præcision for sensorerne (Montem, 2022) ikke er tilstrækkelig god set i forhold til Aarhus Kommunes formål med målingerne og set i forhold til typiske årsmiddelværdier af PM_{2,5} og PM₁₀ på henholdsvis omkring 7-10 µg/m³ og 15-20 µg/m³ i danske byer (Data fra Ellermann et al., 2022).

Vurdering af de målte niveauer for PM_{2,5} og PM₁₀

For 14 ud af de 32 sensorer var datadækningen på mere end 85% i 2021. Årsmiddelværdierne for PM_{2,5} for disse sensorer ligger på mellem 10,6 µg/m³ og 15,3 µg/m³. Det er forventeligt, at niveauerne er relativt ens på de 14 målesteder, men både den højeste og laveste middelværdi ses på de stærkest trafikerede gader i Aarhus, mens koncentrationen på landlig baggrund ligger på 12,7 µg/m³. Niveauerne afspejler derfor ikke forventningerne baseret på, at de største årsmiddelkoncentrationer bør måles ved de stærkest trafikerede gader. Resultaterne peger derfor på, at sensorerne ikke er nøjagtige nok til at kunne måle forskel på niveauerne på de forskellige typer af lokaliteter.

Årsmiddelkoncentrationerne for PM₁₀ ligger for alle målesteder kun mellem 14 og 23% højere end for PM_{2,5}, hvilket er uventet lavt. Der bør også være en væsentligt større forskel i forholdet mellem PM₁₀ og PM_{2,5} for gademålestationer end for landlig baggrund. Målinger på DCE's målestationer viser til eksempel 80% højere årsmiddelværdi for PM₁₀ set i forhold til PM_{2,5} (Ellermann et al., 2022). Konklusionen er derfor, at sensorerne ikke kan måle PM₁₀ retvisende.

Sammenligning mellem sensormålingerne og resultaterne fra DCE's referencemålinger

Resultater fra Montems sensormålinger ved DCE's to målestationer er blevet omregnet til døgnmiddelværdier og herefter sammenlignet med resultaterne fra DCE's målinger. DCE's målinger er udført med EU's referencemetode, som er baseret på døgnopsamlinger udtrykt som døgnmiddelkoncentrationer af partikelforureningen. Sammenligning er foretaget for PM_{2,5} ved bybaggrundsmålestationen ved væksthuse i Botanisk Have og PM_{2,5} og PM₁₀ ved gademålestationen på Banegårdsgade. Sammenligningen er foretaget ved at sammenligne middelværdien for den periode, hvor der er døgnmiddelværdier fra begge målemetoder samt ved at beregne korrelationen mellem de to sæt data.

For PM_{2,5} ved baggrundsmålestationen i Botanisk Have ligger middelværdierne for sensormålingerne 66% højere end resultaterne fra DCE's referencemetode og korrelationen mellem døgnmiddelværdierne fra de to metoder er moderat ($R^2 = 0,5$).

For PM_{2,5} ved gademålestationen i Banegårdsgade ligger middelværdierne for sensormålingerne fint i niveau med resultaterne fra DCE's referencemetode med en forskel på 3% og korrelationen mellem døgnmiddelværdierne fra de to metoder er relativt god ($R^2 = 0,7$) om end korrelationen burde have været bedre. De tilsvarende tal for PM₁₀ ligger med en forskel på middelværdierne på -39% og en relativ beskedne korrelation ($R^2 = 0,4$).

Sammenligningen mellem resultaterne fra sensormålingerne og DCE's referencemetode viser, at sensorerne ikke måler tilfredsstillende, og at der er problemer med både de absolutte niveauer og korrelationen. Sammenligning viser en klar tendens til, at sensorerne måler væsentligt højere i vinterperioden end DCE's referencemetode, hvilket kunne indikere sensorerne er følsomme over for ændringer i de meteorologiske forhold.

Vurdering af den målte variation i timemiddelværdierne

Resultater for sensormålinger af PM₁₀ ved DCE's målestation på gademålestationen ved Banegårdsgade er også blevet omregnet til timemiddelværdier, så det har været muligt at foretage en sammenligning mellem sensormålingerne og DCE's målinger af PM₁₀ med TEOM-metoden. TEOM-metoden giver data på timemiddelniveau, men selv den metode har relativt stor usikkerhed, så derfor er det kun relevant at sammenligne den tidsmæssige variation og ikke de absolutte niveauer. Sammenligningen viste, at der ingen korrelation var mellem de to datasæt ($R^2 = 0,07$).

Vurdering af den målte sæsonvariation

Sammenligning mellem resultaterne fra sensormålingerne og DCE's referencemetode peger på, at sensormålingerne giver for høje resultater om vinteren, hvilket er grunden til, at der er udarbejdet en sammenligning mellem sæsonvariationen bestemt ved hjælp af sensormålingerne og DCE's referencemetode (dvs. variation i månedsmiddelværdierne). Konklusionen heraf er, at sensorernes sæsonvariation er i dårlig overensstemmelse med sæsonvariationen bestemt på basis af DCE's referencemetode. Sensormålingerne måler generelt for højt i de koldeste måneder, mens niveauerne passer væsentligt bedre i de varme måneder. Den målte sæsonvariation baseret på sensorerne har en relativt god overensstemmelse med sæsonvariationen i den relative luftfugtighed, hvilket indikerer, at sensorerne er følsomme over for ændringer i den relative luftfugtighed.

Vurdering af den målte døgnvariation

For yderligere at forstå sensorernes følsomhed over for den relative luftfugtighed har vi inkluderet en sammenligning mellem den årlige gennemsnitlige døgnvariation bestemt med sensormålingerne og sammenlignet denne med døgnvariationen beregnet ud fra DCE's TEOM-målinger ved gademålestationen på Banegårdsgade.

Alle de 14 sensorer med god dækningsgrad i 2021 viser stort set den samme døgnvariation - om end der er en mindre forskel i de absolutte niveauer. De højeste gennemsnitlige timemiddelkoncentrationer måles om natten, hvor der ses en svag stigning fra sidst på aftenen frem til omkring kl. 6, hvorefter koncentrationen aftager indtil de laveste timemiddelkoncentrationer måles midt på dagen. Denne døgnvariation svarer ikke til døgnvariationerne i udledningerne af partikelforurening og afviger væsentligt fra DCE's resultater. DCE's

målinger af døgnvariationen af PM_{10} viser de højeste timemiddelværdier om dagen.

Sensormålingernes døgnvariation matcher til gengæld med variationen i den relative luftfugtighed. Sammenligning mellem gennemsnitlige timemiddelværdier fra sensormålinger med relativ luftfugtighed viser, at omkring 95% af variationen kan forklares alene ud fra variationen i den relative luftfugtighed. Dette viser, at variationer målt med sensorerne i langt højere grad er udtryk for variationerne i den relative luftfugtighed end variationer i koncentrationerne af $PM_{2,5}$ og PM_{10} .

Samlet kvalitetsvurdering

Det er DCE's samlede vurdering, at sensormålingerne ikke er i stand til at give retvisende resultater for $PM_{2,5}$ og PM_{10} med de koncentrationsniveauer, som ses i udeluft i Danmark. Sensorerne viser endvidere på alt for mange af de undersøgte parametre ikke en tilfredsstillende præstation. Den store følsomhed over for ændringer i relativ luftfugtighed viser, at sensorerne i Aarhus Kommunes netværk ikke kan levere data, der opfylder Aarhus Kommunes formål med netværket.

Opbygning af kvalitetsvurderingssystem til den løbende kontrol af sensormålingerne

Det var oprindeligt planen, at DCE skulle lave et system til en løbende kvalitetskontrol af data fra sensorerne i Aarhus Kommunes netværk. Da det i løbet af projektet har vist sig, at sensorerne ikke måler $PM_{2,5}$ og PM_{10} korrekt, så har det ikke været muligt at udarbejde et egentligt system til den løbende kvalitetskontrol. Denne del af projektet består derfor af en mere kvalitativ beskrivelse af de elementer, DCE mener skal indgå i sådan et kvalitetskontrollsystem.

Det vigtigste element i kvalitetsvurderingssystemet er en kvartalsvis sammenligning mellem resultaterne fra sensormålingerne og DCE's resultater fra måling af $PM_{2,5}$ og PM_{10} med EU's referencemetode. Dels foretages en direkte sammenligning mellem sensorerne placeret ved DCE's to målestationer i Aarhus, og dels sammenlignes sensorresultater fra de øvrige målesteder med referencemålingerne på basis af viden om de forventede koncentrationsniveauer vurderet ud fra viden om de lokale kilder i området omkring målestederne.

1. Introduktion

Aarhus Kommune har etableret et netværk af luftforureningssensorer til overvågning af luftkvaliteten i Aarhus og omegn. Netværket af luftforurenings-sensorer drives af firmaet Montem, som har etableret netværket, leveret sensorerne og står for den løbende drift af netværket herunder dataopsamling og online præsentation af data.

Aarhus Kommunes formål med målenetværket baseret på luftforurenings-sensorer er at få etableret en mere finmasket monitoring af luftforureningen, primært af luftforureningen med partikler og kvælstofdioxid. Netværket skal ses som et supplement til den nationale overvågning ved DCE's to målestationer i Aarhus. Samtidigt er det et mål at anvende en teknologi, som gør det muligt nemt at flyttes målestederne, fx til monitoring af særlige indsatser/begivenheder. Endvidere er det målet at anvende sensorer, som har en forskningsmæssig god kvalitet.

DCE – National Center for Miljø og Energi har i begyndelsen af 2022 haft til opgave at gennemføre en kvalitetsvurdering af netværket og resultaterne herfra. Projektet er opdelt i tre dele:

1. Vurdering af netværket med fokus på vurdering af den mest hensigtsmæssige placering af PM- og NO₂/NO-sensorer, herunder vurdering af relevans af måling af NO.
2. Vurdering af kvalitet af målingerne foretaget indtil nu.
3. Opbygning af kvalitetsvurderingssystem til den løbende kontrol af sensormålingerne.

I nærværende rapport præsenteres resultaterne fra ovenstående tre delopgaver.

Det skal indledningsvis bemærkes, at det ikke har været muligt fuldt ud at levere alle de beskrevne delleverancer. Det drejer sig om følgende:

I forbindelse med Del 2 skulle DCE lave en kvalitetsvurdering af måleresultater for kvælstofdioxid (NO₂). Der er imidlertid endnu ikke opsat sensorer til måling af kvælstofdioxid, så derfor udgår denne delleverance.

Endvidere skulle der i Del 2 laves en sammenligning mellem sensormålingernes resultater og resultaterne fra de hidtidige målinger med resultaterne fra DCE's modelberegninger af luftkvaliteten for PM på lokalskala (Luften på din vej). I løbet af projektet er det imidlertid blevet klart, at kvaliteten af sensormålingerne gør en sådan sammenligning irrelevant, så derfor udgår denne delleverance.

Kvaliteten af sensormålingerne har endvidere haft den konsekvens, at det under Del 3 ikke har været muligt at give en grundig beskrivelse af et kvalitetsvurderingssystem for den løbende kontrol af sensormålingerne. Del 3 består derfor af en mere kvalitativ beskrivelse af, hvordan den løbende kvalitetskontrol tænkes gennemført.

Vurderingen af resultaterne fra sensormålingerne har givet anledning til et større arbejde end oprindeligt forventet, hvilket arbejdsmæssigt har opvejet de opgaver, som det ikke har været muligt at gennemføre.

2. Målemetoder og datagrundlag

2.1 Montems sensorer

Montems sensorer til måling af $PM_{2,5}$ og PM_{10} i sensornetværket er af typen Cityprobe 2, som er forsynet med et lille solpanel til levering af strøm til sensorerne. For at sikre nødvendig strømforsyning er sensorerne indstillet til at give en øjebliksmåling hvert 5. minut. Præcision ligger på $\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ved koncentrationer af $PM_{2,5}$ mellem 0 og $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Montem, 2022). For PM_{10} ligger præcisionen på $\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ved koncentrationer mellem 0 og $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (Montem, 2022). Dækningsfaktor fremgår ikke af dokumentet, men der tages udgangspunkt i, at usikkerheden er angivet ved en dækningsfaktor på 2 svarende til et konfidensinterval på 95%. Vi har ikke fået oplyst data om nøjagtigheden på sensorerne. Sensorerne måler primært $PM_{2,5}$, mens PM_{10} bestemmes indirekte via en række beregninger (Christian Østergaard Lauersen, personlig kommunikation den 1. februar 2022).

Sensorerne er blevet kalibreret i laboratoriet af Teknologisk Institut (Ottosen og Hansen, 2021).

DCE har af to omgange modtaget data fra 32 sensorer direkte fra Christian Østergaard Lauersen, Montem (29 sensorer den 27. januar 2022 og tre sensorer den 16. februar 2022). Det er disse data udtrukket af Montem selv, som indgår i kvalitetsvurderingen.

2.2 DCE's målinger

DCE's målinger udføres i forbindelse med den nationale overvågning af luftkvalitet (Delprogram for luft under NOVANA, Ellermann et al., 2022). DCE er af Miljøstyrelsen udpeget til Nationalt Reference Laboratorium i henhold til EU's luftkvalitetsdirektiv (EC, 2008).

DCE's målinger af $PM_{2,5}$ og PM_{10} med døgnmiddeloopsamling følger EU's referencemetode. Metoden er baseret på opsamling af $PM_{2,5}$ respektive PM_{10} på filtre med Low volume sampler efterfulgt af gravimetrisk bestemmelse af den opsamlede mængde partikler. Metoden følger den internationale standard EN/DS 12341, og DCE er akkrediteret af DANAK under ISO-17025 version 2017 til udførelse af disse målinger. DCE deltager med 2-3 års mellemrum i internationale sammenlignende målinger af $PM_{2,5}$ og PM_{10} . Disse sammenlignende målinger arrangeres i relation til EU's luftkvalitetsdirektiv af Joint Research Centre, Ispra, Italien. Resultater fra den sidste internationale sammenligning i 2018 kan findes i Lagler et al. (2010).

DCE's målinger på timemiddelniveau indgår også i forbindelse med kvalitetsvurderingen. Disse målinger udføres med TEOM-metoden (Tapered Element Oscillating Microbalance). TEOM-metoden har den fordel, at den kan måle PM-koncentrationerne med høj tidsopløsning. Til gengæld er der betydeligt større usikkerhed på de absolutte niveauer sammenlignet med DCE's referencemålinger. Disse målinger benyttes primært til orientering af befolkningen om de aktuelle partikelniveauer, og aktuelle data er løbende tilgængelige via DCE's hjemmeside. Disse data er ikke akkrediteret.

Endvidere anvendes DCE's data for relativ luftfugtighed målt ved DCE's meteorologiske målestation i Aalborg, da der ikke var tilstrækkeligt datadækning på målestationen i Aarhus. På årsbasis er der kun mindre forskel i den relative luftfugtighed målt i Aarhus og Aalborg, så derfor kan data fra Aalborg anvendes for Aarhus uden problemer med nøjagtigheden set i forbindelse med den måde data er anvendt i dette projekt.

3. Vurdering af målenetværk i Aarhus

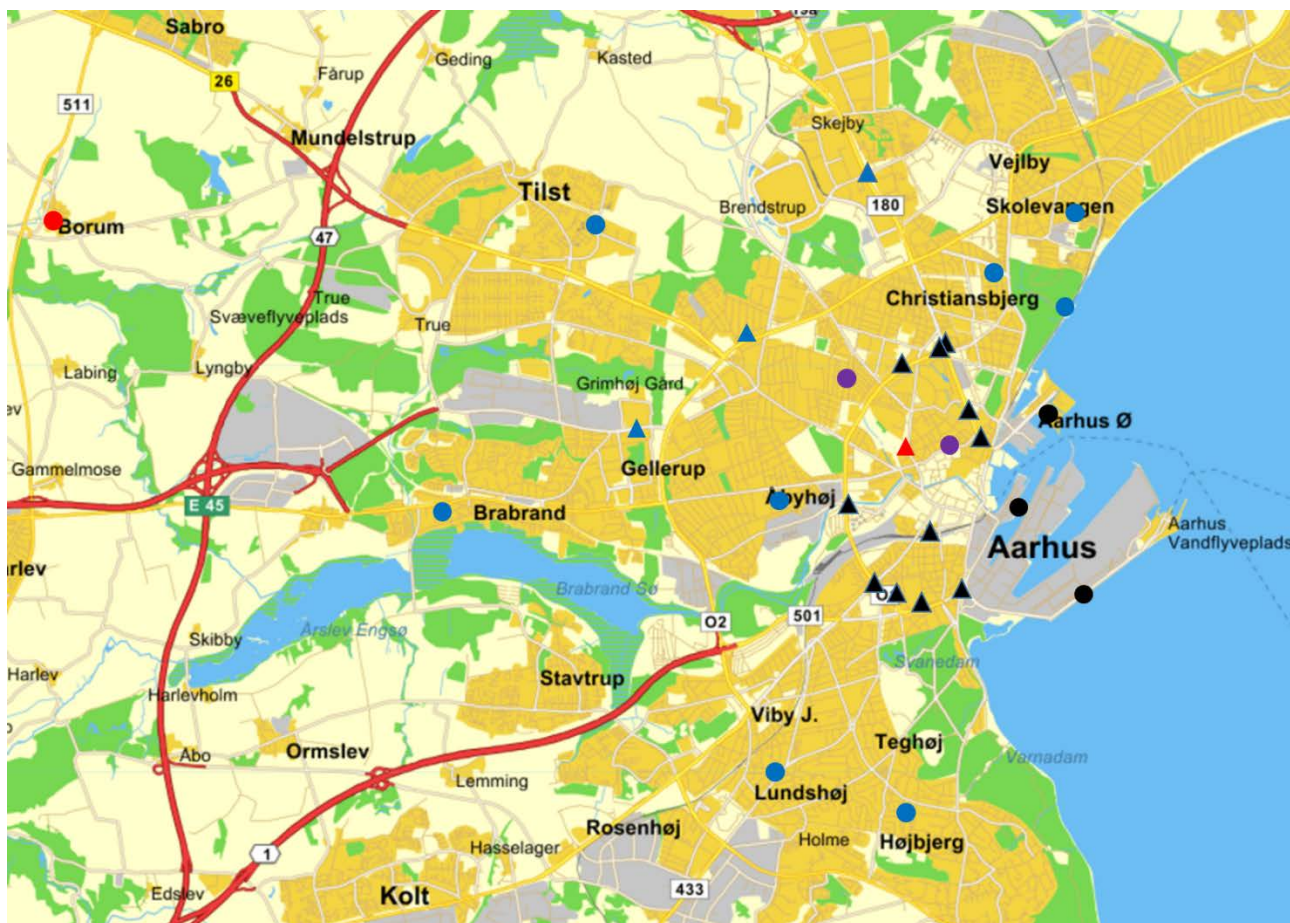
I det følgende præsenteres DCE's vurdering af selve målenetværket. Denne vurdering baseres på Aarhus Kommunes formål med sensornetværket (Kapitel 1). Vurderingen af den detaljerede placering af sensorerne (for eksempel højde over jordoverflade og afstand til vej) tager udgangspunkt i de krav, som EU's luftkvalitetsdirektiv opstiller for den individuelle placering af instrumenter til overvågning af luftkvalitet (betegnes på engelsk "micro siting criteria", EU, 2008), som også danner udgangspunkt for placeringen af de danske målestationer i det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet.

DCE foretog i januar 2022 en fysisk besigtigelse af placeringen af alle sensorer, da det er nødvendigt for kunne vurdere, i hvilken type omgivelser sensoren er placeret (for eksempel landlig baggrund eller tæt trafikeret vej) og mere specifikt detailplaceringen af sensorerne i nærmiljøet. DCE's observationer fra denne besigtigelse fremgår dels af Afsnit 3.1 og 3.2 og dels af Bilag 1, som på tabelform opsummerer DCE's observationer.

Til sidst i kapitlet præsenteres DCE's faglige vurdering af relevans af måling af NO set i forhold til formålet med sensornetværket. Denne vurdering vurderes på DCE's generelle viden om luftkvalitet.

3.1 Overordnet tilrettelæggelse af sensornetværket

DCE har modtaget data fra 32 sensorer placeret ved 29 målesteder, og det er netværket af disse 29 målesteder, som er vurderet i det følgende. Sensorerne dækker et stort geografisk område og er placeret i selve Aarhus og en række omegnsbyer og forstæder til Aarhus. Placeringen af de 29 målesteder fremgår af Figur 3.1.



Figur 3.1. Oversigtskort over placeringen af de 29 målesteder, som indgår i undersøgelsen. Landlig baggrund (rund rød). Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje (rund blå). Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje (trekant blå). Bybaggrund Aarhus (trekant rød). Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje (rund lilla). Aarhus, stærkt trafikerede veje (trekant sort) og Aarhus havn (rund sort).

For at skabe overblik over de mange sensorer har vi inddelt sensorerne i en række kategorier, som giver et fingerpeg om de lokale kilder til partikelforurening (Tabel 3.1). Vi har anvendt følgende kategorier, hvor tallet i parentes angiver antallet af målesteder med sensormålinger placeret i den pågældende kategori:

1. **Landlig baggrund (1).** Lokalitet uden større lokale kilder i nærheden. Primært påvirket af den langtransporterede luftforurening
2. **Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje (8).** Typisk parcelhusområde i omegn af Aarhus uden nævneværdig trafik. Der kan være lokal udledning af brænderøg, men det har ikke været muligt at vurdere omfanget af dette.
3. **Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje (3).** Typisk indfaldsveje til Aarhus med stærk trafik.
4. **Bybaggrund i Aarhus (1).** Område i Aarhus centrum, som ikke er præget af udledninger fra lokale kilder (vejtrafik, brændeovne, industri m.m.).
5. **Aarhus centrum, beboelse, mindre trafikerede veje (2).** Typisk gader i Aarhus centrum uden stærk trafik.
6. **Aarhus centrum, stærkt trafikerede veje (11).** Typisk ringveje og indfaldsveje med stærk trafik.

7. **Aarhus havn (3).** Sensorer placeret i Aarhus havn, hvor der potentielt set kunne være et ekstra bidrag fra havnens aktiviteter herunder trafik til og fra færgeterminal.

Overordnet set er der en hensigtsmæssig fordeling af lokaliteter, og potentielt set vil netværket kunne give god information om, hvor stor en eksponering beboere har i de forskellige dele af Aarhus og omegn. Netværket vil også kunne give information om kilderne til luftforureningen, hvor til eksempel målinger i landlig baggrund (Kategori 1) vil angive hvor stor en andel, som stammer fra den langtransporterede luftforurening, mens målingerne i Aarhus havn (PM_{2,5}, Kategori 8) vil kunne angive det ekstra bidrag, der kommer fra den generelle luftforurening fra Aarhus og aktiviteterne i Aarhus havn.

Når der måles PM_{2,5} og PM₁₀, er det imidlertid en udfordring, at den største andel af partikelforureningen stammer fra langtransport. Til eksempel så er årsmiddelkoncentrationerne af PM_{2,5} kun omkring 40% højere på H.C. Andersens Boulevard i København set i forhold til målingerne i landlig baggrund ved Risø ca. 25 km vest for København, og der er kun omkring 10% forskel mellem årsmiddelkoncentrationerne i bybaggrund og landlig baggrund (Ellermann et al., 2022). Den tilsvarende forskel for PM₁₀ ligger på omkring 90% for H.C. Andersens Boulevard mod landlig baggrund og omkring 10% for bybaggrund mod landlig baggrund. Det vil derfor kræve relativt nøjagtigt måleudstyr, hvis man for alvor skal drage fordel af de mange lokaliteter, hvor der bliver målt i netværket i Aarhus.

Hvis der skulle laves forbedringer på netværket, så vil DCE foreslå, at der foretages flere målinger på grænsen mellem Aarhus havn og den øvrige by med det mål bedre at kunne vurdere, i hvilket omfang havnens aktiviteter påvirker partikelforurening i bycentrum. Endvidere kunne der med fordel udføres flere målinger i deciderede beboelsesområder i Aarhus centrum. Til gengæld kunne man skære lidt ned på antallet af målinger langs de stærkt trafikerede veje i Aarhus, hvis det ikke ville være muligt at øge antallet af målesteder.

Tabel 3.1. Oversigt over de 32 sensorer, herunder start- og slutdato, samt samlet antal dage med målinger (måleperiode).

Navn	Sensor	Start	Slut	Måleperiode Antal dage
Landlig baggrund				
Borum Byvej, Borum, Sabro	202	11-01-2021 16:40	26-01-2022 13:31	380
Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje				
Firkløvervej, Risskov	232	23-03-2021 19:22	26-01-2022 18:40	309
Olaf Rudes Vej, Højbjerg	253	10-05-2021 18:09	26-01-2022 18:39	261
Pihlkjærsvej, Højbjerg	252	10-05-2021 18:01	26-01-2022 19:08	261
Risvang Allé, Aarhus	237	24-03-2021 18:22	26-01-2022 18:17	308
Salonvejen, Risskov	190	19-12-2020 19:30	26-01-2022 19:06	403
Sødalvej, Brabrand	251	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:02	403
Thorsvej, Åbyhøj	239	24-03-2021 18:27	26-01-2022 18:41	308
Østervænget, Tilst	188	19-12-2020 19:29	26-01-2022 18:41	403
Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje				
Edwin Rahrs Vej	230	17-03-2021 09:30	26-01-2022 19:00	315
Hasle Ringvej	293	23-09-2021 17:47	28-12-2021 15:58	96
Randersvej/Skejbygårdsvej	192	19-12-2020 19:30	26-01-2022 18:43	403
Bybaggrund i Aarhus				
Væksthuset Botanisk Have	218	03-02-2021 09:10	26-01-2022 18:48	357
Væksthuset Botanisk Have	299	24-09-2021 08:10	26-01-2022 18:54	124
Aarhus centrum, beboelse, mindre trafikerede veje				
Klostergade	238	24-03-2021 18:27	26-01-2022 18:44	308
Møllevangs Allé	233	24-03-2021 09:11	26-01-2022 18:54	308
Aarhus centrum, stærkt trafikerede veje				
Banegårdsgade	217	02-02-2021 09:56	26-01-2022 17:04	358
Banegårdsgade	288	08-09-2021 15:15	20-11-2021 23:34	73
Marselis Boulevard	191	19-12-2020 19:30	26-01-2022 18:17	403
Nørrebrogade	216	28-01-2021 13:43	26-01-2022 18:42	363
Nørreport	194	19-12-2020 19:31	26-01-2022 18:45	403
Randersvej (overfor Jens Christian Skous Vej)	196	19-12-2020 19:30	26-01-2022 17:33	403
Randersvej/Jens Christian Skous Vej	206	13-01-2021 16:19	26-01-2022 18:43	378
Søndre Ringgade/Christian Wærums Gade	195	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:04	403
Søndre Ringgade/Skanderborgvej	207	13-01-2021 17:01	22-01-2022 12:28	374
Strandvejen	193	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:05	403
Vestre Ringgade/Hangøvej	189	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:08	403
Vestre Ringgade/Søren Frichs Vej	187	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:02	403
Aarhus havn				
Irma Pedersens Gade	229	16-03-2021 13:00	26-01-2022 18:46	316
Polensgade	275	15-06-2021 13:56	10-01-2022 00:01	208
Østhavnsvej	254	10-05-2021 18:27	26-01-2022 19:00	261
Østhavnsvej	204	13-01-2021 14:59	26-01-2022 18:37	378

3.2 Detailplacering af sensorerne

I EU's luftkvalitetsdirektiv angives en række kriterier for den individuelle placering af målestederne i de nære omgivelser (EU, 2008). Dette drejer sig om følgende:

Strømningen omkring prøvetagningsindtaget skal være fri (i en bue på mindst 270°) uden hindringer, der påvirker luftstrømmen i nærheden af prøvetageren, (normalt nogle meter fra bygninger, balkoner, træer og andre hindringer og mindst 0,5 m fra den nærmeste bygning i tilfælde af prøvetagningssteder, der repræsenterer luftkvaliteten ved bygningslinjen).

1. Generelt skal indtaget for prøvetagningsstedet være mellem 1,5 m (indåndingszonen) og 4 m over jorden. Højere placeringer (indtil 8 m) kan i nogle tilfælde være nødvendig. Højere placering kan også være hensigtsmæssig, hvis målestedet er repræsentativt for et stort område.
2. Prøvetagerens indtag må ikke være placeret i umiddelbar nærhed af kilder for at undgå direkte indtag af emissioner, der ikke er blandet med luften.
3. Prøvetagerens udledning skal være placeret således, at genindtag af udledningsluften undgås.
4. Ved måling af alle forurenende stoffer skal trafikorienterede prøvetagningsindtag befinde sig mindst 25 m fra udkanten af større kryds, og højst 10 m fra fortovskanten

Kriterie 3 er dog ikke relevant for sensormålinger, da sensorerne ikke påvirker udledningsluften.

Generelt set overholder sensorernes placering disse krav på tilfredsstillende vis. Alle sensorer er for eksempel placeret i omtrent 4 meters højde. Dog er der for nogle sensorer nogle problematiske forhold, som kan illustreres af følgende:

- En række sensorer sidder for tæt på større trafikerede kryds
- Sensoren på Polenskej sidder for tæt på huset
- Sensoren på Møllevangs Alle sidder midt på kørebanen
- Sensoren på Edwin Rahrs vej sidder for langt fra vejkanterne

Hvis man skulle optimere netværket, skal denne slags forhold bringes i orden. Endvidere er der en vis forskel mellem sensorernes afstand til nærmeste vejbane (kantsten). Det kunne være hensigtsmæssigt, hvis der var en mere ensartet afstand til nærmeste vejbane, hvilket navnlig er relevant for de stærkt trafikerede veje. Det skal dog også anerkendes, at dette kan være vanskeligt, da veje ofte er udformet på forskellig vis samt afhængigheden af eksisterende lysmaster eller lignende til opsætning af sensorerne.

3.3 Relevans af måling af kvælstofmonooxid

Kvælstofoxider (NO_x) består af summen kvælstofmonooxid (NO) og kvælstofdioxid (NO₂), hvor det er kvælstofdioxid, som er sundhedsskadelig. Der er opstillet grænseværdier for luftkoncentrationerne af kvælstofdioxid via EU's luftkvalitetsdirektiver (EC, 2008). Derfor er det i første omgang kvælstofdioxid, som skal overvåges i et luftkvalitetsnetværk.

I danske byer er udledningerne fra vejtrafik den vigtigste kilde til kvælstofoxider, som udledes både som kvælstofmonooxid og kvælstofdioxid, hvor fordelingen mellem de to komponenter kan variere betydeligt mellem forskellige køretøjer. I luften foregår der endvidere en række kemiske reaktioner, hvor de to komponenter omdannes til hinanden. Disse kemiske reaktioner er afhængige af ozon og mængden af lys. Under typiske forhold udgøres størstedelen af kvælstofoxiderne af kvælstofdioxid, mens kvælstofmonooxid kun udgør en mindre andel. Undtaget herfra er stærkt trafikerede gader, hvor kvælstofmonooxid kan være til stede i relativt store mængder navnlig i myldretiden. Selv i bybaggrund udgør kvælstofmonooxid kun en mindre andel, og jo længere væk man kommer fra de stærkt trafikerede gader, jo mindre andel er der af kvælstofmonooxid.

Derfor er det sjældent, at kvælstofmonooxid indgår særskilt i et luftkvalitetsnetværk, og der er ingen krav i EU's luftkvalitetsdirektiv om at overvåge luftkvalitet i relation til kvælstofmonooxid. Derimod bliver den samlede mængde af kvælstofoxider ofte overvåget, da mængden af kvælstofoxider er et godt mål for udledningerne fra vejtrafik, og overvågning af kvælstofoxider kan bruges til at vurdere for eksempel udviklingstendens for udledning af kvælstofoxider fra vejtrafikken. Dette er ikke muligt alene på baggrund af målinger af kvælstofdioxid grundet den varierende sammensætning af udledningerne fra trafikken og de kemiske omdannelser i luften.

I forhold til Aarhus Kommunes netværk af luftforureningssensorer vurderes det derfor ikke relevant at måle kvælstofmonooxid i sig selv. Derimod ville en samlet løsning, hvor der måles både kvælstofdioxid og den samlede mængde kvælstofoxider være fagligt relevant og ud fra dette kunne mængden af kvælstofmonooxid beregnes.

4. Kvalitetsvurdering af resultater for partikel-forureningen

Kvalitetsvurderingen af resultaterne for $PM_{2,5}$ og PM_{10} fra målenetværket er foretaget i en række trin:

1. Vurdering af omfanget af outliers
2. Vurdering af datadækning
3. Reproducerbarhed og stabilitet af sensormålingerne
4. Vurdering af de målte niveauer for $PM_{2,5}$ og PM_{10}
5. Sammenligning mellem sensormålingerne og resultaterne fra DCE's referencemålinger
6. Vurdering af den målte variation i timemiddelværdierne
7. Vurdering af den målte sæsonvariation
8. Vurdering af den målte døgnvariation

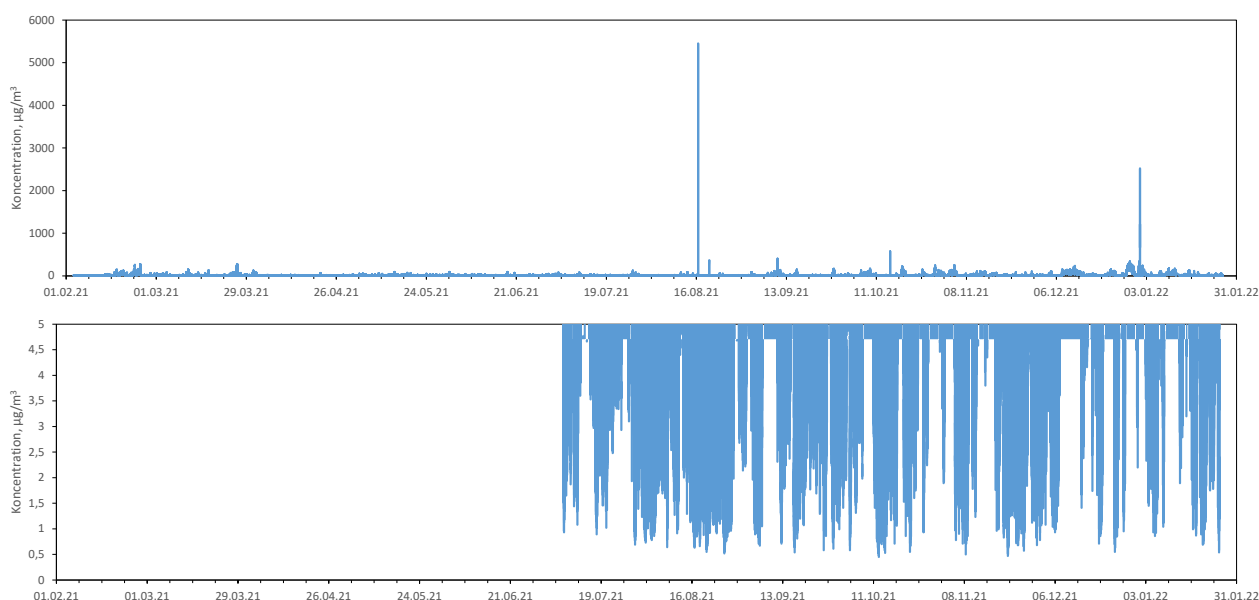
I det følgende præsenteres resultaterne fra disse. Herefter gives en sammenfattende kvalitetsvurdering af resultaterne fra sensorerne i målenetværket i Aarhus.

4.1 Vurdering af omfanget af outliers

Det første skridt i kvalitetskontrollen bestod i identifikation af outliers fra sensorerne. Denne identifikation blev baseret på grafisk præsentation af data fra de enkelte sensorer. Et eksempel på resultater fra en sensor kan ses i figur 4.1, som viser resultaterne fra Sensor 218 placeret på Banegårdsgade. Den øverste graf viser alle resultater, og her kan det ses, at der er målt urealistisk høje koncentrationer omkring den 16. august 2021, hvilket har medført, at tre målere-resultater er blevet kasseret for både $PM_{2,5}$ og PM_{10} . Den næsthøjeste top ses den 1. januar 2022 mellem kl. 0:00 og 1:00. De høje koncentrationer skyldes formentligt nytårsfyrværkeri. Da sensorerne måler en øjeblikskoncentration for hvert 5. minut, så vil der kunne forekomme meget høje koncentrationer, hvis nytårsfyrværkeri er blevet affyret tæt ved sensoren umiddelbart inden øjeblikskoncentrationen er blevet målt. Derfor er de høje koncentrationer omkring nytår ikke kasseret.

På den nederste graf er y-aksen "forstørret", så de laveste værdier kan ses. Det fremgår, at der ikke forekommer negative værdier eller nogen nul-værdier, så derfor kan der ikke observeres markante outliers i forbindelse med de laveste koncentrationer.

Efter gennemgang af resultaterne fra samtlige 32 sensorer vurderes det, at der typisk kun er tale om 1-5 outliers per sensor i forbindelse med de højeste koncentrationer. Dette er tilfredsstillende, da det er stort set umuligt helt at undgå outliers.



Figur 4.1. Grafisk afbildning af de enkelte måleværdier for PM_{2,5} fra Sensor 218 placeret ved DCE's målestation på Banegårdsgade. Den nederste graf viser et "forstørret" udsnit af de laveste koncentrationer.

4.2 Vurdering af datadækning

Tabel 4.1 viser en oversigt over resultaterne for alle 32 sensorer, som DCE har modtaget data for fra Montem. Tabellen angiver datadækningen udregnet i procent af hele den periode, hvor de enkelte sensorer har været i brug (kolonne 6). Datadækningen er beregnet med udgangspunkt i måling af PM_{2,5} og PM₁₀ for hvert 5. minut, hvilket betyder, at der er foretaget 12 øjebliksmålinger for hver time. Visse af sensorerne har periodevis kørt med en lavere frekvens af dataopsamlingen, ligesom der for nogle af sensorerne er en vis variation i, hvor hyppigt PM_{2,5} og PM₁₀ er blevet målt. Den nedsatte frekvens vil give sig udslag i en dårligere datadækning.

I forbindelse med EU's luftkvalitetsdirektiver er der opstillet et krav om, at der i forbindelse med beregning af årsmiddelværdier skal være datadækningen på mindst 85%, når man tager højde for den nedetid, som normalt kan forventes i forbindelse med service og kalibrering af instrumenterne (EU, 2008).

Ved vurdering af datadækningen for sensorerne har vi valgt ligeledes at tage udgangspunkt i, at der skal være mindst 85% datadækning for en sensor i løbet af måleperioden. Dette kan virke som et relativt højt krav set i forhold til, at der er tale om måling med relativt simple sensorer. Imidlertid måler sensorerne kun PM_{2,5} og PM₁₀ hvert femte minut, og ved hver måling er der tale om en øjebliksmåling (Christian Østergaard Lauersen, personlig kommunikation den 1. februar 2022). Det betyder, at datadækningen i forvejen er lav, så derfor er det ud fra et fagligt synspunkt valgt at holde fast i kravet om mindst 85% datadækning.

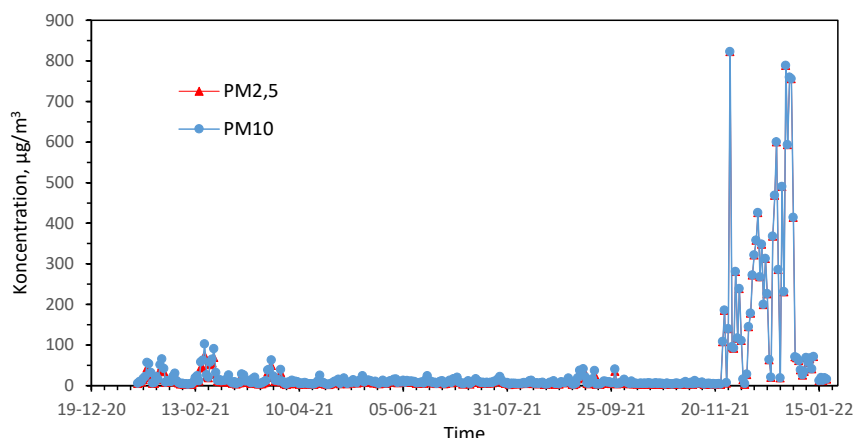
27 af de 32 sensorer har haft en tilstrækkelig datadækning i den periode, hvor de har målt. For de fem resterende lå to af dem kun lidt under kravet, mens tre lå betydeligt under kravet. Datadækningsgraden anses umiddelbart for tilfredsstillende set i forhold til formålene med målenetværket i Aarhus.

Tabel 4.1. Oversigt over gennemsnitskoncentrationerne for PM_{2,5} og PM₁₀ for de 32 sensorer i Aarhus og omegn. Bemærk at opsamlingsperioden varierer fra sensor til sensor. Datadækning er beregnet på basis af 12 måledata for hver time svarende til en øjebliksmåling for hvert femte minut. Endvidere angives forholdet mellem PM_{2,5} og PM₁₀. Der er foretaget parallelmålinger på tre lokaliteter, som er agivet med italic.

Navn	Sensor	Start	Slut	Måleperiode Antal dage	Data-dæk- ning %	PM _{2,5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	PM ₁₀ / PM _{2,5}
Landlig baggrund								
Borum Byvej, Borum, Sabro	202	11-01-2021 16:40	26-01-2022 13:31	380	86	12,8	15,0	1,17
Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje								
Firkløervej, Risskov	232	23-03-2021 19:22	26-01-2022 18:40	309	97	12,5	15,3	1,23
Olaf Rudes Vej, Højbjerg	253	10-05-2021 18:09	26-01-2022 18:39	261	97	15,5	19,9	1,28
Pihlkjærsvvej, Højbjerg	252	10-05-2021 18:01	26-01-2022 19:08	261	98	14,5	17,7	1,22
Risvang Allé, Aarhus	237	24-03-2021 18:22	26-01-2022 18:17	308	98	13,5	17,1	1,27
Salonvejen, Risskov	190	19-12-2020 19:30	26-01-2022 19:06	403	86	12,9	15,9	1,24
Sødalssvej, Brabrand	251	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:02	403	93	13,8	16,6	1,20
Thorsvej, Åbyhøj	239	24-03-2021 18:27	26-01-2022 18:41	308	97	12,9	15,6	1,21
Østervænget, Tilst	188	19-12-2020 19:29	26-01-2022 18:41	403	60	18,8	23,9	1,27
Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje								
Edwin Rahrs Vej	230	17-03-2021 09:30	26-01-2022 19:00	315	97	13,1	16,2	1,24
Hasle Ringvej	293	23-09-2021 17:47	28-12-2021 15:58	96	94	14,6	18,3	1,25
Randersvej/Skejbygårdsvej	192	19-12-2020 19:30	26-01-2022 18:43	403	87	15,5	19,3	1,25
Bybaggrund i Aarhus								
Væksthuset Botanisk Have	218	03-02-2021 09:10	26-01-2022 18:48	357	86	12,7	15,8	1,24
Væksthuset Botanisk Have	299	24-09-2021 08:10	26-01-2022 18:54	124	97	18,7	23,8	1,27
Aarhus centrum, beboelse, mindre trafikerede veje								
Klostergade	238	24-03-2021 18:27	26-01-2022 18:44	308	92	18,0	19,1	1,06
Møllevangs Allé	233	24-03-2021 09:11	26-01-2022 18:54	308	99	13,3	16,4	1,23
Aarhus centrum, stærkt trafikerede veje								
Banegårdsgade	217	02-02-2021 09:56	26-01-2022 17:04	358	81	8,9	10,1	1,13
Banegårdsgade	288	08-09-2021 15:15	20-11-2021 23:34	73	77	10,4	12,1	1,16
Marselis Boulevard	191	19-12-2020 19:30	26-01-2022 18:17	403	92	13,1	15,3	1,17
Nørrebrogade	216	28-01-2021 13:43	26-01-2022 18:42	363	98	10,9	13,2	1,22
Nørreport	194	19-12-2020 19:31	26-01-2022 18:45	403	96	12,5	14,3	1,14
Randersvej (overfor Jens Christian Skous Vej)	196	19-12-2020 19:30	26-01-2022 17:33	403	95	16,5	20,3	1,23
Randersvej/Jens Christian Skous Vej	206	13-01-2021 16:19	26-01-2022 18:43	378	98	12,8	15,4	1,20
Søndre Ringgade/ Christian Wærums Gade	195	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:04	403	95	14,1	16,9	1,20
Søndre Ringgade/Skanderborgvej	207	13-01-2021 17:01	22-01-2022 12:28	374	97	17,4	19,1	1,10
Strandvejen	193	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:05	403	96	12,3	14,8	1,20
Vestre Ringgade/Hangøvej	189	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:08	403	88	12,0	14,3	1,19
Vestre Ringgade/Søren Frichs Vej	187	19-12-2020 19:31	26-01-2022 19:02	403	93	13,7	16,5	1,20
Aarhus havn								
Irma Pedersens Gade	229	16-03-2021 13:00	26-01-2022 18:46	316	98	11,6	13,8	1,20
Polensgade	275	15-06-2021 13:56	10-01-2022 00:01	208	14	11,6	14,4	1,24
Østhavnsvej	254	10-05-2021 18:27	26-01-2022 19:00	261	62	15,5	19,5	1,26
Østhavnsvej	204	13-01-2021 14:59	26-01-2022 18:37	378	96	40,2	41,8	1,04

4.3 Vurdering af de målte niveauer for PM_{2.5} og PM₁₀

De gennemsnitlige middelkoncentrationer for PM_{2,5} og PM₁₀ kan se af Tabel 4.1 (kolonne 7 og 8). Den ene sensor på Østhavnsvej (Sensor 204) har en væsentligt højere middelkoncentration end alle de øvrige sensorer, herunder den anden sensor på samme lokalitet på Østhavnsvej (Sensor 254). Årsagen til dette er, at Sensor 204 måler væsentligt højere koncentrationer i den sidste del af måleperioden, og der må derfor være tale om en fejl på sensoren (Figur 4.2). Ved gennemgang af alle sensorerne var der tilsvarende tydelige afvigelser på Sensor 207 (Søndre Ringgade) og 238 (Klostergade), og disse to sensorer har også høje middelkoncentrationer, selv om de ikke er helt så afvigende som Sensor 204. Det vurderes, at der er tale om fejl på alle disse tre sensorer.



Figur 4.2. Døgnmiddelkoncentration beregnet for Sensor 204. Det tydelige spring i koncentrationen ses i slutningen af november, hvilket viser, at der må være en fejl på sensoren. Figuren viser både $PM_{2,5}$ og PM_{10} , men forskellen på koncentrationerne af de to komponenter er så lille, at man ikke kan se forskel på $PM_{2,5}$ og PM_{10} .

For de resterende 29 sensorer ligger middelkoncentrationerne for PM_{2,5} i måleperioden mellem 8,9 og 18,8 µg/m³, og PM₁₀ ligger mellem 10,1 og 23,9 µg/m³ (Tabel 4.1). Dette er en væsentligt større variation end man normalt ville forvente. For eksempel er der kun omkring 40% forskel mellem den højeste og laveste årsmiddel-koncentration målt på DCE's målestationer ved hjælp af EU's referencemetode (Ellermann et al., 2022). En af de umiddelbare forklaringer på variationen er, at sensorerne har forskellige måleperioder og har målt på forskellige tidspunkter af året (Tabel 4.1). Da der er en vis årstidsvariation i koncentrationerne, vil disse forskelle alt andet lige give anledning til forskelle i middelkoncentrationerne for måleperioderne (illustreret i Figur 4.3).

Tabel 4.2. Oversigt over gennemsnitskoncentrationerne i 2021 for PM_{2,5} og PM₁₀ for 29 sensorer i Aarhus og omegn. Sensor 204 og 207 er udeladt fra tabellen grundet de afvigende målinger i den sidste del af måleperioden, mens Sensor 188 er udeladt grundet manglende målinger i fire måneder midt i måleperioden. Datadækning er beregnet på basis af 12 måledata for hver time i hele 2021 svarende til en øjebliksmåling for hvert femte minut. Endvidere angives forholdet mellem PM_{2,5} og PM₁₀. Der er foretaget parallelmålinger på tre lokaliteter, som er angivet med italic, hvor den ene sensor ved Østhavnsvej er udeladt grundet fejl.

Navn	Sensor	Datadækning i 2021 %	PM _{2,5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	PM ₁₀ /PM _{2,5}
Landlig baggrund					
Borum Byvej, Borum, Sabro	202	86	12,7	14,8	1,17
Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje					
Firkløvervej, Risskov	232	76	12,0	14,6	1,22
Olaf Rudes Vej, Højbjerg	253	63	14,8	18,8	1,27
Pihlkjærsvej, Højbjerg	252	64	13,9	16,9	1,21
Risvang Allé, Aarhus	237	77	13,0	16,3	1,26
Salonvejen, Risskov	190	87	12,3	15,1	1,23
Sødalsvej, Brabrand	251	95	13,3	15,9	1,20
Thorsvej, Åbyhøj	239	76	12,4	15,0	1,21
Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje					
Edwin Rahrs Vej	230	77	12,5	15,4	1,23
Hasle Ringvej	293	25	14,6	18,3	1,25
Randersvej/Skejbygårdsvej	192	85	14,9	18,6	1,25
Bybaggrund i Aarhus					
<i>Væksthuset Botanisk Have</i>	218	89	12,3	15,1	1,23
<i>Væksthuset Botanisk Have</i>	299	27	18,6	23,7	1,27
Aarhus centrum, beboelse, mindre trafikerede veje					
Møllevangs Allé	233	77	12,7	15,5	1,22
Aarhus centrum, stærkt trafikerede veje					
<i>Banegårdsgade</i>	217	79	8,9	10,0	1,13
<i>Banegårdsgade</i>	288	15	10,4	12,1	1,16
Marselis Boulevard	191	95	12,6	14,8	1,17
Nørrebrogade	216	91	10,6	12,9	1,21
Nørreport	194	97	12,0	13,7	1,14
Randersvej (overfor Jens Christian Skous Vej)	196	93	15,3	18,8	1,22
Randersvej/Jens Christian Skous Vej	206	95	12,4	14,8	1,19
Søndre Ringgade/Christian Wærums Gade	195	97	13,6	16,3	1,20
Strandvejen	193	98	11,8	14,2	1,20
Vestre Ringgade/Hangøvej	189	92	11,6	13,7	1,19
Vestre Ringgade/Søren Frichs Vej	187	95	13,2	15,8	1,20
Aarhus havn					
Irma Pedersens Gade	229	79	11,1	13,2	1,19
Polensgade	275	8	11,2	14,0	1,24
<i>Østhavnsvej</i>	254	38	15,1	19,0	1,26

For de 14 sensorer, som har mindst 85% datadækning i 2021, ligger middelkoncentrationerne for PM_{2,5} mellem 10,6 og 15,3 µg/m³ og PM₁₀ ligger mellem 12,9 og 18,8 µg/m³ (Tabel 4.3). Forskellen mellem de højeste og laveste årsmiddelkoncentrationer ligger nu på omkring 45% for såvel PM_{2,5} og PM₁₀. Ved DCE's målestationer er forskellen mellem de højeste og laveste årsmiddelkoncentrationer i 2021 omkring 40% og 90% for henholdsvis PM_{2,5} og PM₁₀ (Ellermann et al., 2022). Det stemmer derfor godt for PM_{2,5}, men indikerer, at der er for lille forskel for PM₁₀.

Årsmiddelværdierne for både PM_{2,5} og PM₁₀ for DCE's referencemålinger viser, at de højeste årsmiddelkoncentrationer måles ved de stærkt trafikerede gademålestationer, mens de laveste årsmiddelkoncentrationer måles i landlig baggrund, hvilket er i overensstemmelse med at vejtrafik bidrager væsentligt til partikelforureningen via udledninger af partikler fra udstødning, dæk-, bremse- og vejslid (Ellermann et al., 2022). Dette mønster ses ikke for sensormålingerne i Aarhus (Tabel 4.3), hvor den laveste årsmiddelkoncentration måles ved Nørrebrogade og hele fem sensorer ved stærkt trafikerede veje i Aarhus centrum giver lavere årsmiddelkoncentrationer end sensoren placeret i landlig baggrund i Borum. Dette viser, at sensorerne enten ikke er nøjagtige nok til at måle den korrekte geografiske variation i partikelforureningen, eller at sensorerne ikke er tilstrækkeligt godt kalibreret. Det kan også være en kombination af disse to årsager, eller der kan være andre faktorer, som påvirker resultaterne (for eksempel meteorologiske forhold).

Tabel 4.3 angiver, at forholdet mellem PM₁₀ og PM_{2,5} varierer mellem 1,14 og 1,25 med et gennemsnit på 1,2 for de 14 sensorer. Samtidig ses også, at der ikke er forskel på forholdet uanset i hvilke omgivelser (fx landlig baggrund eller stærkt trafikeret vej) sensormålingerne foretages. Ved DCE's målestationer måles et forhold på 2,2 ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København, 1,8 ved Banegårdsgade i Aarhus og 1,65 i landlig baggrund ved Risø, Roskilde (Ellermann et al., 2022). Det større forhold målt ved H.C. Andersens Boulevard hænger sammen med, at vejtrafik bidrager med en større andel til PM₁₀ end til PM_{2,5} (Ellermann et al., 2022).

Sensorerne i Aarhus måler derfor ikke det korrekte forhold mellem PM₁₀ og PM_{2,5}, og det er forkert, at der ikke er forskel mellem forholdet målt i landlig baggrund og ved gademålestationerne. Montem har oplyst, at sensorerne laver en egentlig måling af PM_{2,5}, mens PM₁₀ bestemmes indirekte via en række beregninger (Christian Østergaard Lauersen, Montem, personlig kommunikation den 1. februar 2022). Det formodes derfor, at metoden til bestemmelse af PM₁₀ ikke er tilstrækkeligt nøjagtig, eller at der er andre faktorer, som påvirker resultaterne. Dette undersøges yderligere i de efterfølgende kapitler.

Tabel 4.3. Oversigt over gennemsnitskoncentrationerne i 2021 for PM_{2,5} og PM₁₀ for de 14 sensorer, som har en datadækning på mindst 85% i 2021. Datadækning er beregnet på basis af 12 måledata for hver time i hele 2021 svarende til en øjebliksmåling for hvert femte minut. Endvidere angives forholdet mellem PM_{2,5} og PM₁₀. Sensor 204 og 207 er udeladt grundet afvigende resulater for den sidste del af måleperioden.

Navn	Sensor	Datadækning i 2021 %	PM _{2,5} µg/m ³	PM ₁₀ µg/m ³	PM ₁₀ /PM _{2,5}
Landlig baggrund					
Borum Byvej, Borum, Sabro	202	86	12,7	14,8	1,17
Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje					
Salonvejen, Risskov	190	87	12,3	15,1	1,23
Sødalsvej, Brabrand	251	95	13,3	15,9	1,20
Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje					
Randersvej/Skejbygårdsvej	192	85	14,9	18,6	1,25
Bybaggrund i Aarhus					
Væksthuset Botanisk Have	218	89	12,3	15,1	1,23
Aarhus centrum, stærkt trafikerede veje					
Marselis Boulevard	191	95	12,6	14,8	1,17
Nørrebrogade	216	91	10,6	12,9	1,21
Nørreport	194	97	12,0	13,7	1,14
Randersvej (overfor Jens Christian Skous Vej)	196	93	15,3	18,8	1,22
Randersvej/Jens Christian Skous Vej	206	95	12,4	14,8	1,19
Søndre Ringgade/Christian Wærums Gade	195	97	13,6	16,3	1,20
Strandvejen	193	98	11,8	14,2	1,20
Vestre Ringgade/Hangøvej	189	92	11,6	13,7	1,19
Vestre Ringgade/Søren Frichs Vej	187	95	13,2	15,8	1,20

4.4 Reproducerbarhed og stabilitet af sensormålingerne

Ved tre lokaliteter er der opsat to sensorer ved siden af hinanden. Dette gør det muligt at vurdere sensorernes reproducerbarhed, hvilket er et udtryk for om sensorerne måler ensartet. Dette er vigtigt, når man skal sammenligne målinger på to eller flere forskellige lokaliteter, for eksempel i forbindelse med vurdering af om koncentrationerne af PM_{2,5} er højere ved en landlig baggrundsmålestation end ved en stærkt trafikeret gade.

Reproducerbarheden angiver til gengæld ikke noget om, hvorvidt sensorerne måler det rigtige koncentrationsniveau, hvilket betegnes nøjagtigheden. Nøjagtigheden kan fastlægges ved sammenligning med resultater fra målinger udført med referencemålemetoder, hvilket omtales i afsnit 4.3.

Montem har gennemført parallelle målinger ved tre lokaliteter:

DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthuse i Botanisk Have

DCE's gademålestation på Banegårdsgade

Østhavnsvej

I det følgende gennemgås resultaterne fra de parallelle målinger. Sammenligningen er foretaget på basis af timemiddelværdier beregnet for hver af sensorerne. Baggrunden for dette er, at øjebliksmålingerne for hvert femte minut ikke er synkroniseret fuldstændigt mellem sensorerne. Derfor kan man ikke

sammenligne mellem de enkelte øjebliksmålinger fra de to sensorer opsat på samme lokalitet.

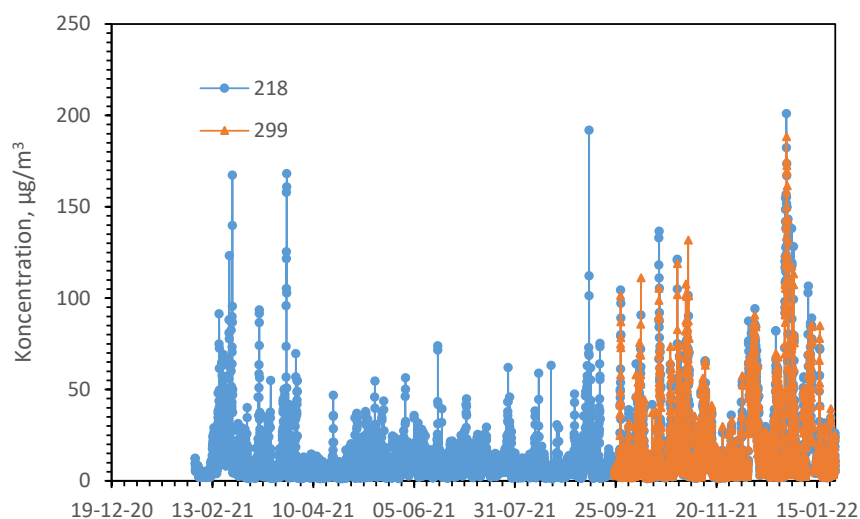
Sammenligningerne mellem de parallelle målinger er i det følgende kun præsenteret med figurer for PM_{2,5}, da denne parameter er den vigtigste og den mest pålidelige parameter, da PM₁₀-værdierne er afledt af denne. Tabellerne præsenterer imidlertid tallene for både PM_{2,5} og PM₁₀.

Væksthusene i Botanisk Have

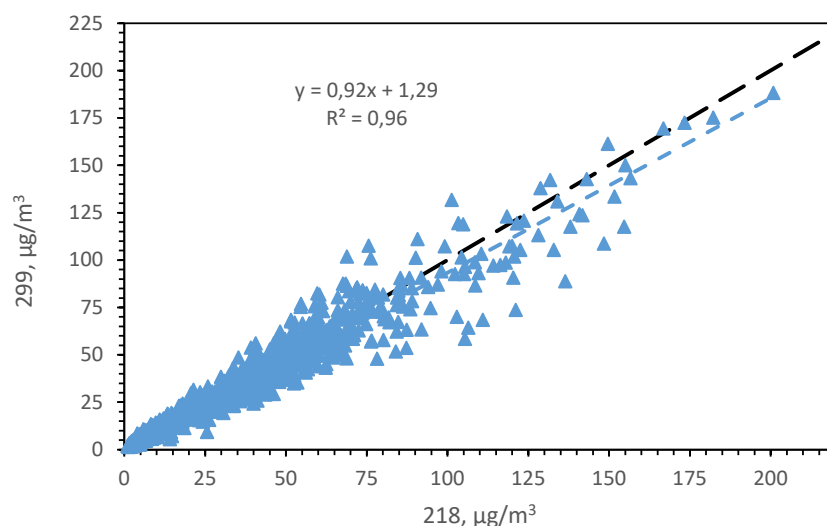
Figur 4.4 og 4.5 viser sammeligning for timemiddelværdier for de to sensorer opsat ved DCE's målestation ved væksthusene i Botanisk Have. Der ses en relativt god tidsmæssig overensstemmelse mellem de to sensorer (korrelationskoefficient – $R^2 = 0,96$), og middelværdierne for perioden med samtidige målinger er også i god overensstemmelse (Tabel 4.4). Tabel 4.4 angiver også den relative usikkerhed (between sampler uncertainty) mellem data opsamlet med de to sensorer med dækningsfaktor 2 svarende til 95% konfidensinterval. Denne usikkerhed er beregnet i henhold til Standard DS/EN 12341 (DS/EN 2014). Usikkerheden er stor, når man ser den i forhold til de målte niveauer, men svarer til specifikationerne for sensorerne ($\pm 10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM_{2,5} og $\pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ for PM₁₀; Montem, 2022).

Table 4.4. Sammenligning mellem resultaterne fra Sensor 218 og 299, som er opsat parallelt med hinanden ved DCE's målestation ved væksthusene i Botanisk Have. Der indgår kun data, hvor der er samtidige timemiddelværdier for de to sensorer, hvilket er årsag til, at middelværdierne afviger fra resultaterne angivet i Tabel 4.1. Antallet af timemiddelværdier er 2783. Usikkerhed (between sampler uncertainty) er angivet med dækningsfaktor på to og er udregnet i henhold til DS/EN 12341 (DS/EN 2014).

	PM _{2,5}	PM ₁₀
Middel Sensor 218, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18,3	23,8
Middel Sensor 299, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	18,2	23,0
Forskel middelværdi, %	0,9	3,3
Usikkerhed, $\mu\text{g}/\text{m}^3$	6,9	11,4



Figur 4.4. Timemiddelkoncentrationer for PM_{2,5} fra Sensor 218 og 299, som begge er opsat tæt ved hinanden ved DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthusene i Botanisk Have.



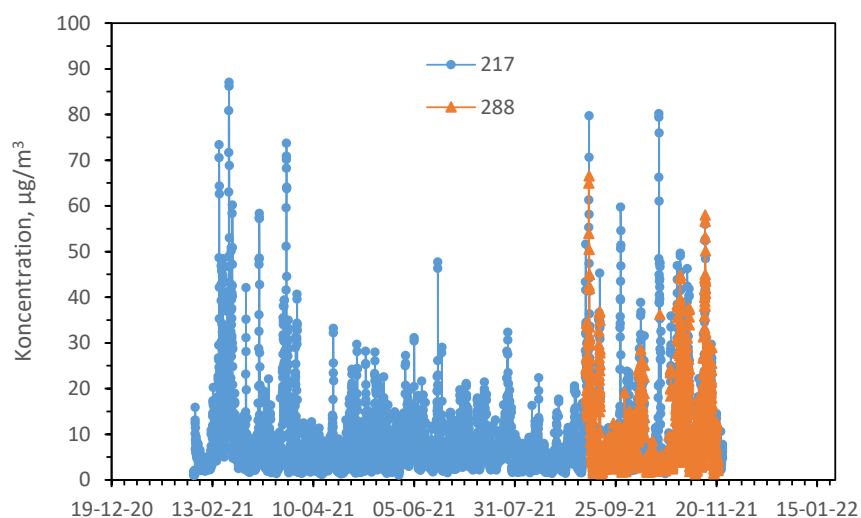
Figur 4.5. Timemiddelkoncentrationer fra $PM_{2,5}$ for Sensor 299 afbildet som funktion af resultaterne fra Sensor 218. Begge sensorer er opsat tæt ved hinanden ved DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthuse i Botanisk Have. Den sorte stiplede linje angiver 1:1-linjen. Den blå stiplede linje er en tendenslinje beregnet ved lineær regression.

Banegårdsgade

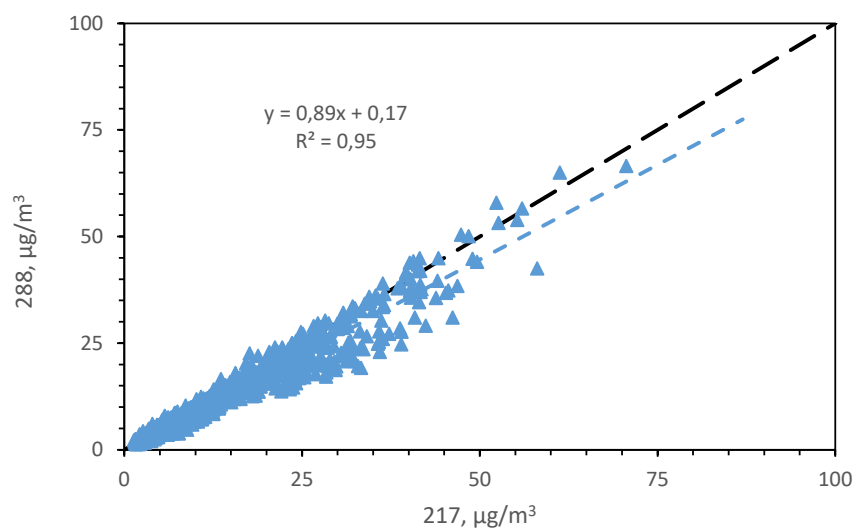
Figur 4.6 og 4.7 viser sammeligning af timemiddelværdier for de to sensorer opsat ved DCE's målestation på Banegårdsgade. Der ses en relativt god tidsmæssig overensstemmelse mellem de to sensorer (korrelationskoefficient – $R^2 = 0,95$) og middelværdierne for perioden med samtidige målinger er også i relativt god overensstemmelse (Tabel 4.5) - om end resultaterne er noget ringere end ved væksthuse i Botanisk Have. Tabel 4.5 angiver også den relative usikkerhed (between sampler uncertainty) mellem data opsamlet med de to sensorer med dækningsgrad 2 svarende til 95% konfidensinterval. Usikkerheden er relativt lille og i god overensstemmelse med specifikationerne for sensorerne (Montem, 2022).

Table 4.5. Sammenligning mellem resultaterne fra Sensor 217 og 288, som er opsat parallelt med hinanden ved DCE's målestation på Banegårdsgade. Der indgår kun data, hvor der er samtidige timemiddelværdier for de to sensorer, hvilket er årsag til, at middelværdierne afviger fra resultaterne angivet i Tabel 4.1. Antallet af timemiddelværdier er 1275. Usikkerhed (between sampler uncertainty) er angivet med dækningsgrad på to og er udregnet i henhold til DS/EN 12341 (DS/EN 2014).

	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Middel Sensor 217, $\mu g/m^3$	11,5	13,0
Middel Sensor 288, $\mu g/m^3$	10,4	12,1
Forskel middelværdi, %	10	7
Usikkerhed, $\mu g/m^3$	4	4



Figur 4.6. Timemiddelkoncentrationer for PM_{2,5} fra Sensor 218 og 299, som begge er opsat tæt ved hinanden ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade.



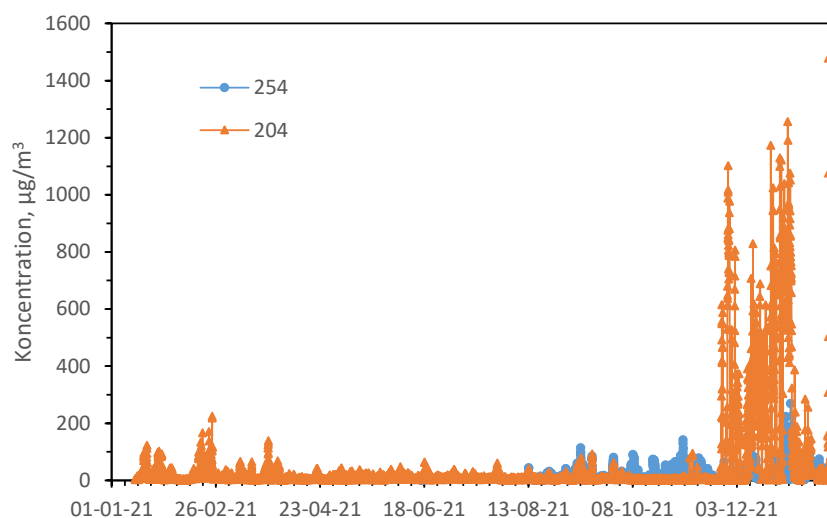
Figur 4.7. Timemiddelkoncentrationer for PM_{2,5} fra Sensor 288 afbildet som funktion af resultaterne fra Sensor 217. Begge sensorer er opsat tæt ved hinanden ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade. Den sorte stiplede linje angiver 1:1-linjen. Den blå stiplede linje er en tendenslinje beregnet ved lineær regression.

Østhavnsvej

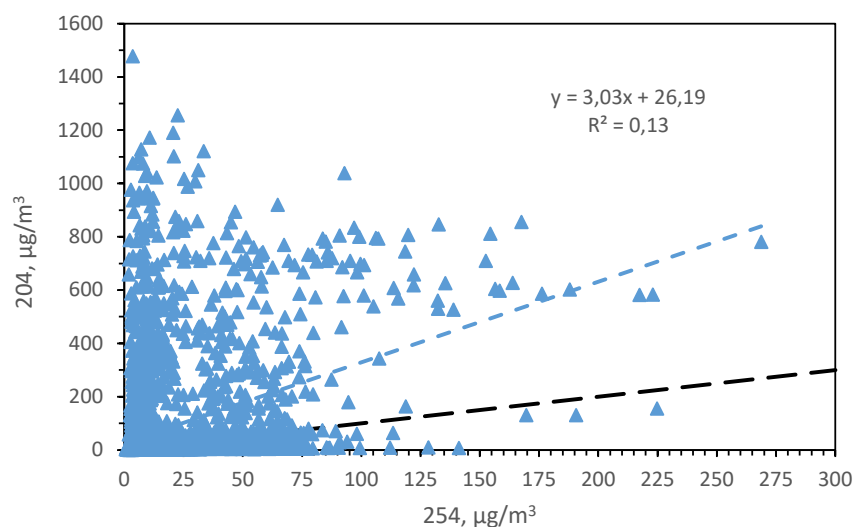
Figur 4.8 og 4.9 viser sammeligning af timemiddelværdier for de to sensorer, som er opsat parallelt på Østhavnsvej. Der ingen korrelation mellem de to sensorer, og middelværdierne er meget forskellige. Den primære årsag er, at Sensor 204 begynder at måle meget højere værdier ultimo november, hvilket peger på, at sensoren ikke længere fungerer som den skal. I store dele af efteråret er der også stor forskel på de to sensorer - om end forskellen ikke er helt så stor, og her er det Sensor 254, som er højere end Sensor 204.

Table 4.6. Sammenligning mellem resultaterne fra Sensor 254 og 204, som er opsat parallelt med hinanden i lygtepæl på Østhavnsvej. Der indgår kun data, hvor der er samtidige timemiddelværdier for de to sensorer, hvilket er årsag til, at middelværdierne afviger fra resultaterne angivet i Tabel 4.1. Antalt af timemiddelværdier er 3764. Usikkerhed (between sampler uncertainty) er angivet med dækningsgrad på to og er udregnet i henhold til DS/EN 12341 (DS/EN 2014).

	PM _{2,5}	PM ₁₀
Middel Sensor 254, µg/m ³	15,4	19,3
Middel Sensor 204, µg/m ³	72,7	73,6
Forskel middelværdi, %	130	117
Usikkerhed, µg/m ³	258	254



Figur 4.8. Timemiddeldkoncentrationer for PM_{2,5} fra Sensor 204 og 254, som begge er opsat tæt ved hinanden på lygtepæl på Østhavnsvej.



Figur 4.9. Timemiddeldkoncentrationer for PM_{2,5} fra Sensor 204 afbildet som funktion af resultaterne fra Sensor 254. Begge sensorer er opsat tæt ved hinanden på lygtepæl på Østhavnsvej. Den sorte stiplede linje angiver 1:1-linjen. Den blå stiplede linje er en tendenslinje beregnet ved lineær regression.

4.5 Sammenligning mellem sensormålingerne og resultaterne fra DCE's referencemålinger

Nøjagtigheden af sensorerne kan vurderes ved sammenligning med de sande værdier. I praksis er disse selvfølgelig ikke til rådighed, så derfor sammenlignes med de bedst tilgængelige værdier, hvilket i dette tilfælde er DCE's målinger med EU's referencemetode (EC, 2008). DCE udfører disse målinger akkrediteret og deltager hvert andet eller hvert tredje år i internationale sammenlignende målinger ved EU Joint Research Centre i Ispra, Italien. Disse sammenlignende målinger organiseres i relation til EU's luftkvalitetsdirektiver og med deltagelse af hovedparten af EU's medlemslande. Dokumentation for DCE's resultater fra de sammenlignende målinger kan findes i Lagler et al. (2019).

DCE's målinger med referencemetoden foretages med døgnopsamling. Derfor er der beregnet døgnmiddelværdi for sensorerne inden sammenligningen. Kun døgn med datadækning på mere end 75% indgår ved sammenligningen.

Ved begge DCE's målestationer måles der parallelt med to sensorer, hvor den ene af sensorerne har en væsentligt længere måleperiode end den anden. Det er kun sensorerne med den længste opsamlingsperiode (Sensor 217 og 218), der er anvendt i forbindelse med sammenligningen til DCE's referencemetode, mens de to øvrige sensorer er udeladt grundet den kortere måleperiode (Sensor 288 og 299).

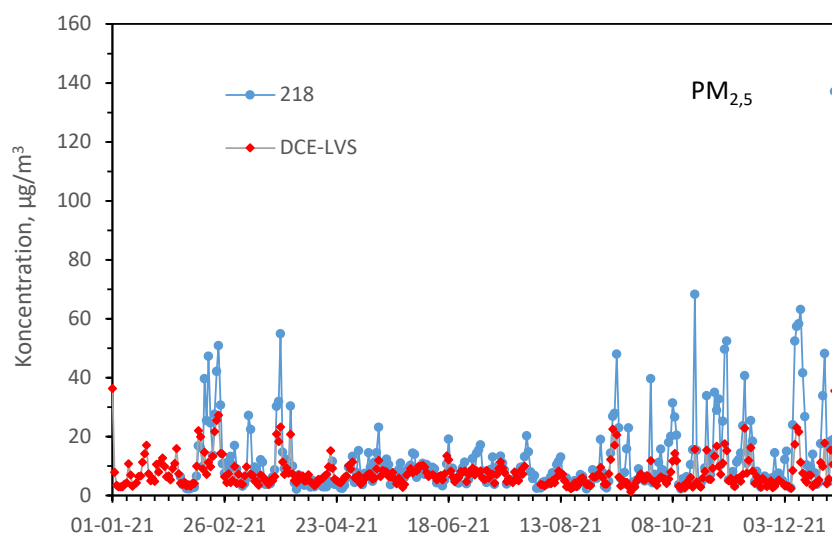
Væksthusene ved Botanisk Have

Figur 4.10 og 4.11 viser sammenligning mellem døgnmiddelværdier for PM_{2,5} fra DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthusene i Botanisk Have beregnet ud fra sensormålingerne og målt med DCE's referencemetode. Der måles ikke PM₁₀ med DCE's referencemetode ved denne målestation.

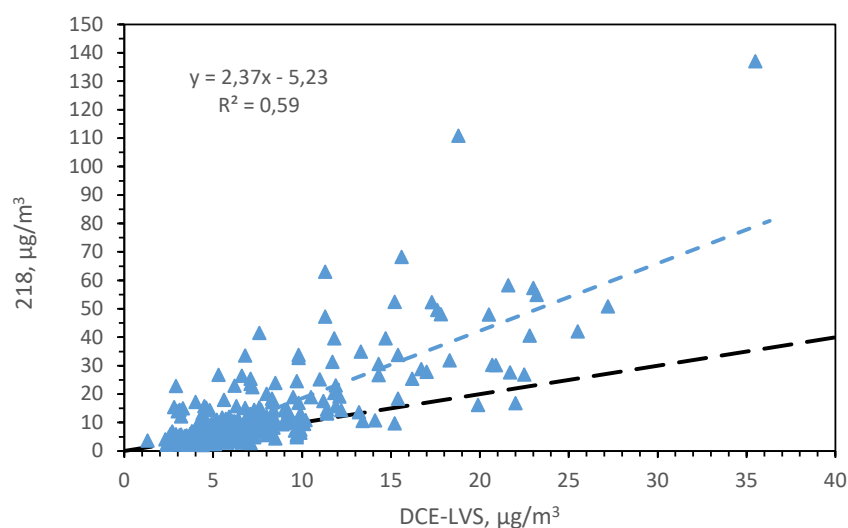
Korrelationen mellem resultaterne fra de to metoder er moderat ($R^2=0,59$), hvor det er resultaterne fra vintermånederne, der giver størst forskel mellem de to metoder. Det er i denne periode, hvor de højeste værdier måles med sensoren. I gennemsnit for perioden med resultater fra begge metoder måles 66% højere koncentrationer med sensoren set i forhold til DCE's referencemetode (Tabel 4.7).

Table 4.7. Sammenligning mellem middelværdi for PM_{2,5} fra Sensor 218 og DCE's målinger med referencemetoden (DCE-LVS) ved DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthusene i Botanisk Have. Det indgår kun data, hvor der er samtidige timemiddelværdier for de to sensorer, hvilket er årsag til at middelværdierne afviger fra resultaterne angivet i Tabel 4.1. Antallet af døgnmiddelværdier er 331.

	PM _{2,5}
Middel Sensor 218, µg/m ³	12,4
Middel DCE-LVS, µg/m ³	7,4
Forskel middelværdi, %	66



Figur 4.10. Døgnmiddelkoncentrationer for $PM_{2,5}$ fra Sensor 218 og DCE's referencemetode ved DCE's bybaggrundsmålestationen ved væksthuse i Botanisk Have.

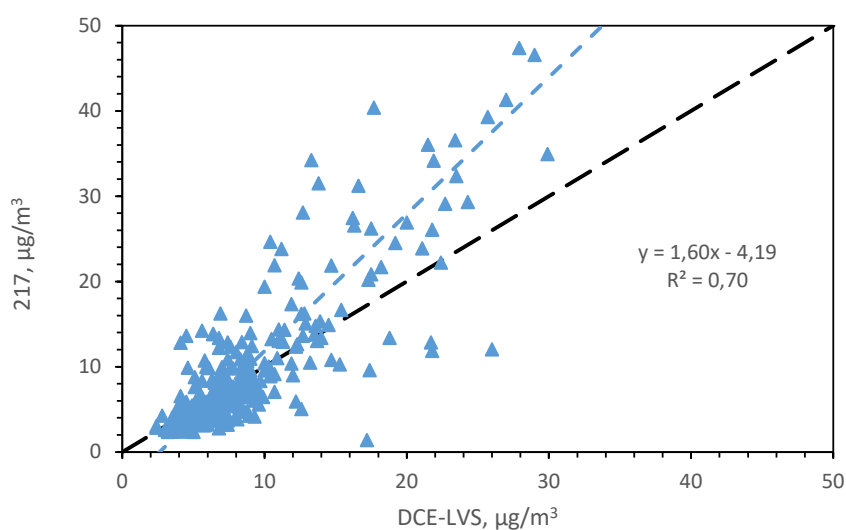
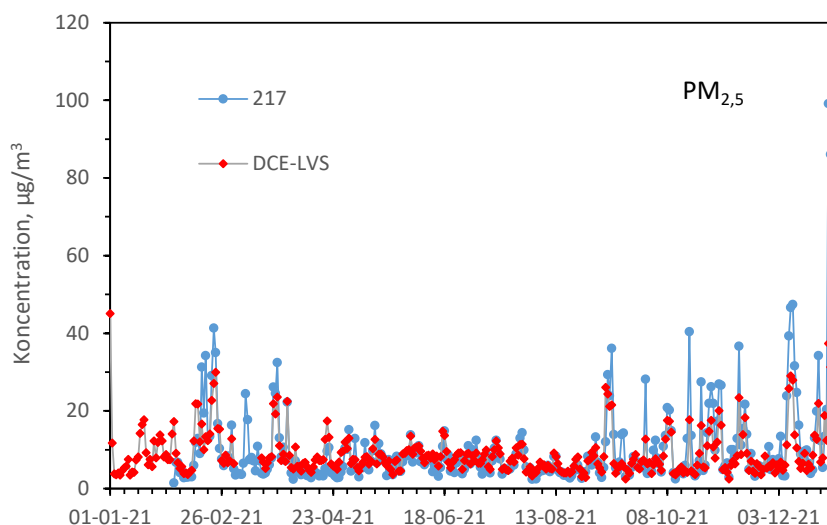


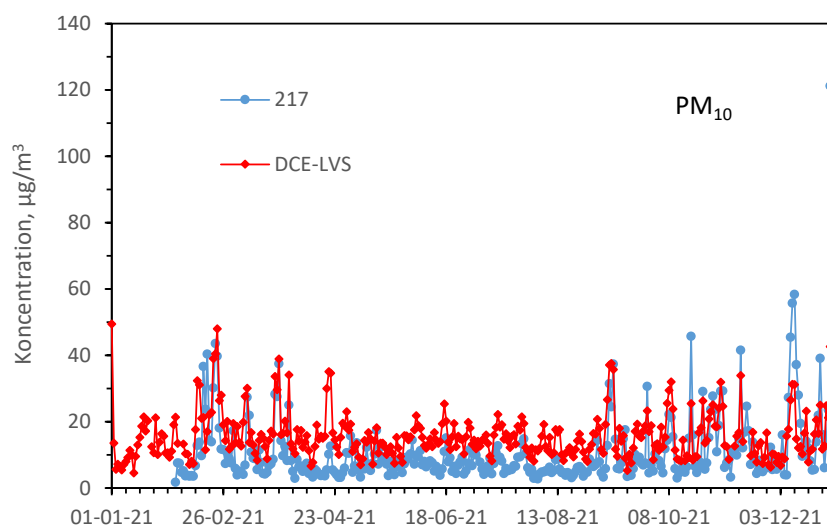
Figur 4.11. Døgnmiddelkoncentrationer for $PM_{2,5}$ fra Sensor 218 afbildet som funktion af resultaterne fra DCE's målinger med referencemetoden (DCE-LVS). Målingerne er foretaget ved DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthuse i Botanisk Have. Den sorte stiplede linje angiver 1:1-linjen. Den blå stiplede linje er en tendenslinje beregnet ved lineær regression.

Banegårdsgade

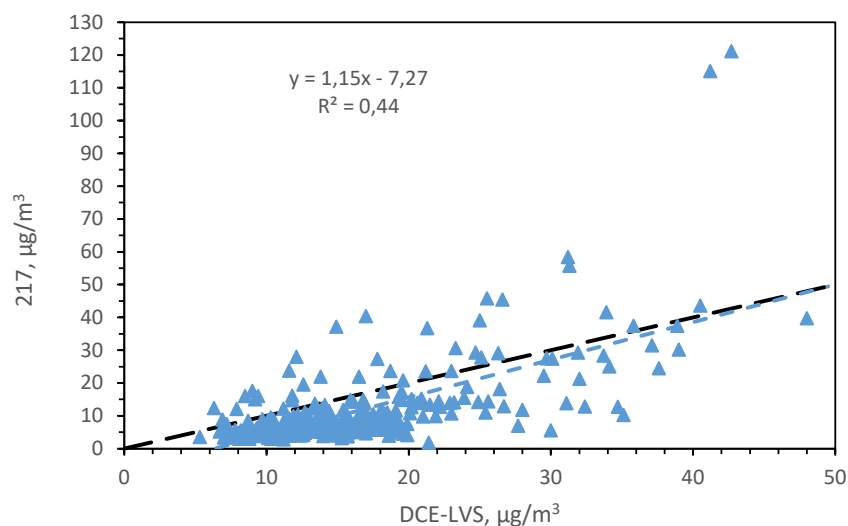
Figur 4.12 - 4.15 viser sammenligning mellem døgnmiddelværdier for $PM_{2,5}$ og PM_{10} fra DCE's gademålestation på Banegårdsgade beregnet ud fra sensormålingerne og målinger med DCE's referencemetode. Korrelationen mellem resultaterne fra de to metoder er relativt høj for $PM_{2,5}$ ($R^2=0,70$) og moderat for PM_{10} ($R^2=0,44$). For $PM_{2,5}$ ses igen den største forskel i vintermånederne (Figur 4.12). For PM_{10} er billedet noget anderledes, da der ses en tydelig forskel i det generelle niveau, hvor resultaterne fra DCE's referencemålinger generelt set ligger højere end resultaterne fra Sensor 217 (Figur 4.14). Oven i dette ses også en tendens til, at sensoren måler for højt i vintermånederne. I gennemsnit for perioden med resultater fra begge

Table 4.8. Sammenligning mellem middelværdier for PM_{2,5} og PM₁₀ fra Sensor 217 og DCE's målinger med referencemetoden (DCE-LVS) ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade. Der indgår kun data, hvor der er samtidige timemiddelværdier for de to sensorer, hvilket er årsag til, at middelværdierne afviger fra resultaterne angivet i Tabel 4.1. Antallet af døgnmiddelværdier er 293.





Figur 4.14. Døgnmiddelkoncentrationer for PM₁₀ fra Sensor 217 og DCE's referencemetode ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade.



Figur 4.15. Døgnmiddelkoncentrationer for PM₁₀ fra Sensor 217 afbildet som funktion af resultaterne fra DCE's målinger med referencemetoden (DCE-LVS). Målingerne er foretaget ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade. Den sorte stiplede linje angiver 1:1-linjen. Den blå stiplede linje er en tendenslinje beregnet ved lineær regression.

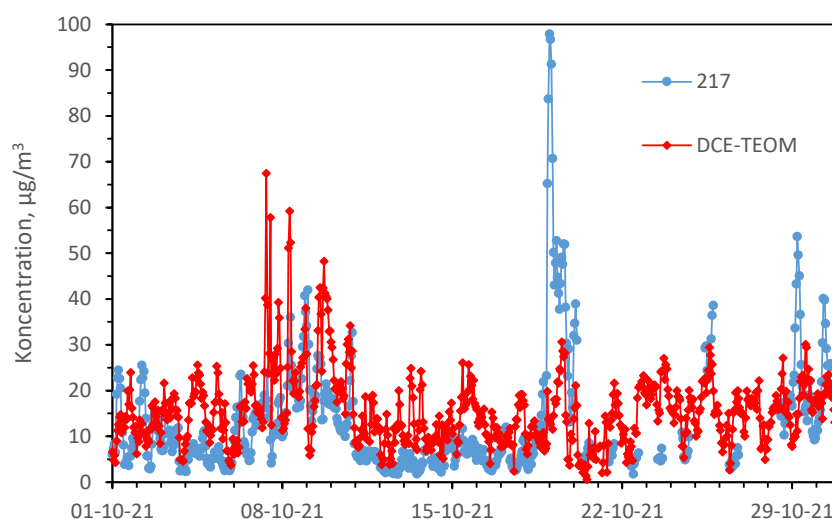
4.6 Vurdering af den målte variation i timemiddelværdierne

Ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade måles timemiddelværdier med TEOM-metoden, som har den fordel, at den kan give resultater på time-niveau. Til gengæld er usikkerheden større og i forbindelse med den nationale overvågning af luftkvalitet benyttes metoden da også kun til orientering af befolkningen om den aktuelle luftkvalitet time for time. Det er DCE's målinger med referencemetoden, som anvendes til den officielle vurdering af overholdelse af grænseværdier og bestemmelse af udviklingstendens.

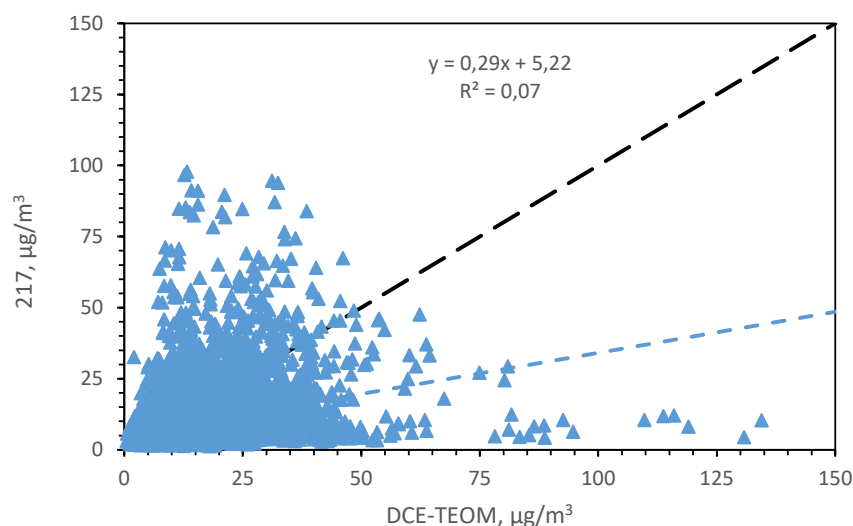
På trods af den forøgede usikkerhed har vi valgt at lave en sammenligning mellem timemiddelværdier bestemt med sensorerne og DCE's målinger med TEOM-metoden. Dette hænger sammen med, at vi ikke har andre muligheder for at vurdere kvaliteten af den relative variation i timemiddelværdierne. Det er derfor vigtigt at holde denne forøgede usikkerhed for øje, når man vurderer resultaterne fra sammenligningen præsenteret nedenfor.

Figur 4.16 viser en sammenligning mellem den tidsmæssige variation i time-middelværdierne for PM₁₀ bestemt med Sensor 217 og DCE's TEOM-metode ved gademålestationen i Banegårdsgade. Figuren viser kun et udsnit for oktober, da det ikke er muligt at vise alle de mange timemiddelværdier i en samlet figur uden at miste muligheden for at vise variationen mellem de enkelte timemiddelværdier. De andre måneder svarer i rimelig grad til billedet fra oktober. Det er udelukkende den tidslige variation, der er i fokus og her ses, at der ofte kan være stor forskel mellem Sensor 217 og resultaterne fra DCE.

Figur 4.17 viser et scatterplot, hvor alle timemiddelværdier målt med Sensor 217 er afbildet mod de tilsvarende timemiddelværdier bestemt med DCE's TEOM-metode. Her vises samtlige 6800 timemiddelværdier, hvor der er resultater fra begge metoder. Som det ses af figuren, så er der ingen korrelation mellem resultaterne fra de to målemetoder ($R^2=0,07$).



Figur 4.16. Timemiddelkoncentrationer for PM₁₀ fra Sensor 217 og DCE's referencemetode ved DCE's gademålestationen på Banegårdsgade i oktober måned 2021.



Figur 4.17. Timemiddelkoncentrationer for PM₁₀ fra Sensor 217 afbildet som funktion af resultaterne fra DCE's målinger med TEOM-metoden (DCE-TEOM). Målingerne er foretaget ved DCE's gademålestation på Banegårdsgade. Den sorte stiplede linje angiver 1:1-linjen. Den blå stiplede linje er en tendenslinje beregnet ved lineær regression.

4.7 Vurdering af den målte sæsonvariation

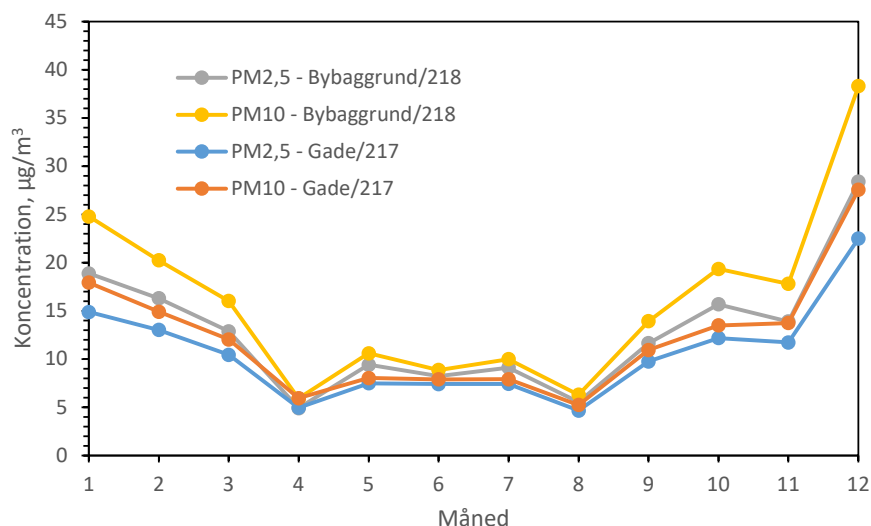
Sammenligningen mellem resultaterne fra sensorerne og fra DCE's målinger med referencemetoden indikerer, at forskellen mellem resultaterne fra de to metoder er størst i vinterhalvåret, mens der er bedre overensstemmelse i sommerhalvåret. Dette indikerer, at sensorerne kunne være følsomme over for forandringer i de meteorologiske forhold. Derfor har vi undersøgt sæsonvariationen i PM_{2,5} og PM₁₀ bestemt ved hjælp af sensorerne og sammenlignet denne med sæsonvariationen bestemt ud fra målingerne med DCE's referencemetode.

Figur 4.18 viser sæsonvariation i 2021 fastlagt ud fra månedsmiddelværdier for PM_{2,5} og PM₁₀ ved bybaggrundsmålestationen ved Væksthuset Botanisk Have (Sensor 218) og gademålestationen i Banegårdsgade (Sensor 217). Sensor 217 har kun en datadækning på 79% i 2021 (Tabel 3.2) og opfylder dermed ikke datadækningskriteriet (85%), men da datadækningen næsten opfylder kriteriet, har vi valgt at inddrage denne sensor i analysen af sæsonvariationen bestemt med DCE's referencemetode ved gademålestationen. De to øvrige sensorer ved disse målestationer (Sensor 288 og 299, som er brugt i forbindelse med parallelmålingerne ved de to målestationer) er ikke inddraget, da datadækningen er for lille til at kunne dække hele året (under 30%).

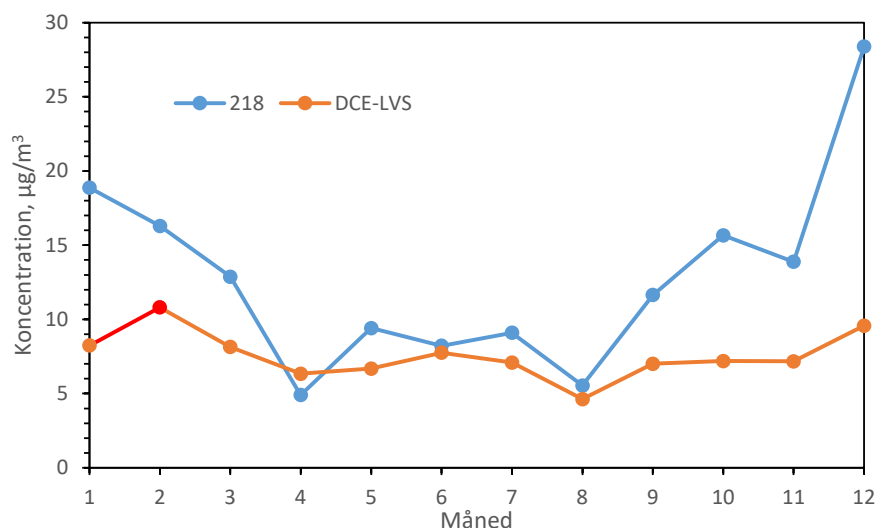
Sæsonvariationen er meget ens for de to målestationer, og der ses også omtrent samme sæsonvariation for PM_{2,5} og PM₁₀. De højeste koncentrationer ses i vinterhalvåret med højeste koncentrationer i januar og december. De laveste koncentrationer ses i sommerhalvåret med laveste koncentrationer i april og august. De højeste koncentrationer ses i bybaggrund, mens koncentrationerne ved gademålestationen ligger noget lavere for både PM_{2,5} og PM₁₀. Dette er klart mod forventningen, da vejtrafik bidrager til PM_{2,5} og PM₁₀ både fra udstødningen og dæk-, bremse, og vejslid.

Det er forventeligt, at koncentrationerne er højest i vinterhalvåret, da udledning af partikelforurening og de partikeldannende gasser er højest i vinterhalvåret. Imidlertid viser sensorerne en væsentligt større sæsonvariation end

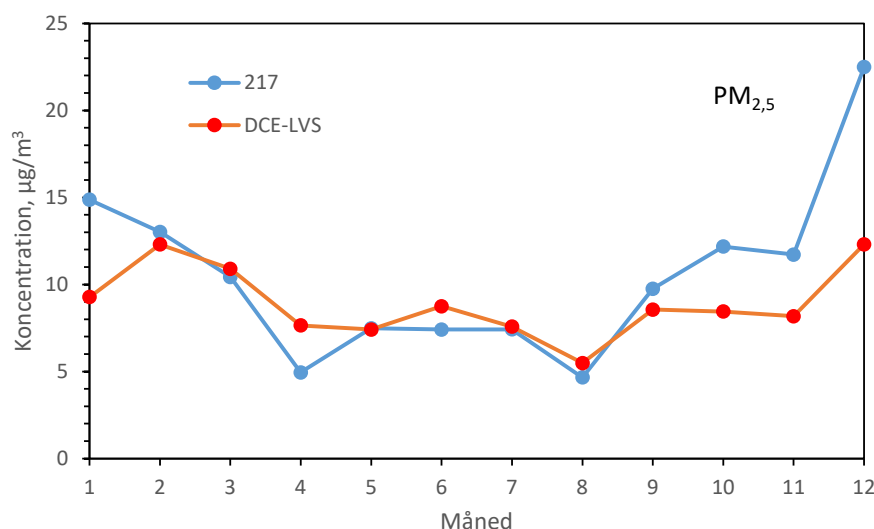
den, der måles med DCE's referencemetode. Figur 4.19 og 4.20 viser sammenligning mellem sæsonvariationen for $PM_{2,5}$ bestemt med sensorerne og DCE's referencemetode ved henholdsvis bybaggrundsmålestationen ved Væksthuset i Botanisk Have og gademålestationen på Banegårdsgade. Ved begge målestationer ses en nogenlunde overensstemmelse for sommerhalvåret, mens sensorerne giver væsentligt højere månedsmiddelmålinger i vinterhalvåret. I december ses til eksempel en tre gange højere månedsmiddelmåling på bybaggrundsmålestationen (Figur 4.19) og en to gange højere månedsmiddelmåling på gademålestationen (Figur 4.20).



Figur 4.18. Månedsmiddelværdier for $PM_{2,5}$ og PM_{10} i 2021 fra sensormålingerne ved DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthuse i Botanisk Have (Sensor 218) og gademålestationen på Banegårdsgade (Sensor 217).



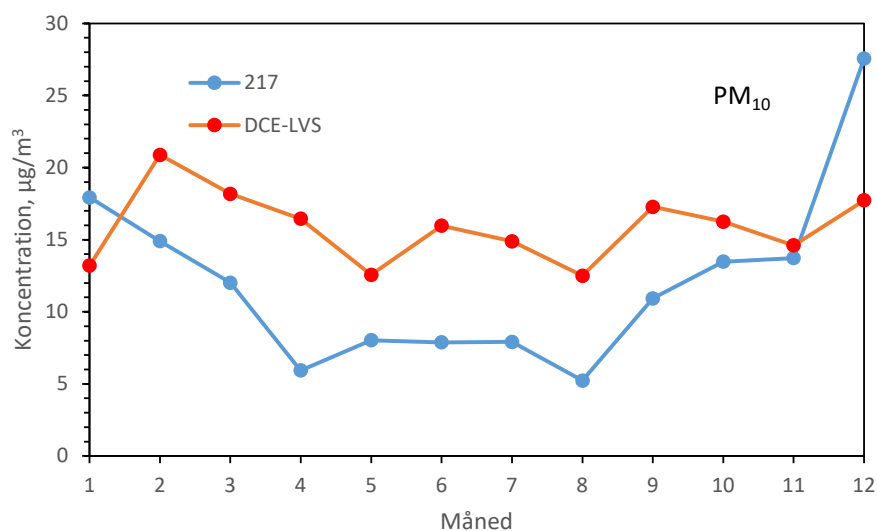
Figur 4.19. Sammenligning mellem månedsmiddelværdier for $PM_{2,5}$ i 2021 målt ved DCE's bybaggrundsmålestation ved væksthuse i Botanisk Have med Sensor 218 og DCE's referencemetode (DCE-LVS).



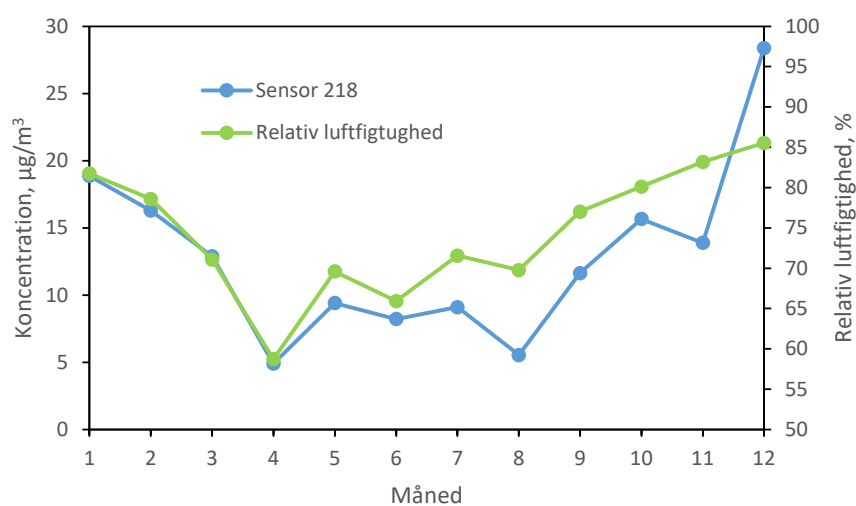
Figur 4.20. Sammenligning mellem månedsmiddelværdier for $PM_{2,5}$ i 2021 målt ved DCE's gademålestationen på Banegårdsgade med Sensor 217 og DCE's referencemetode (DCE-LVS).

Figur 4.21 viser en tilsvarende sammenligning for månedsmiddelkoncentrationen af PM_{10} ved gademålestationen (PM_{10} måles ikke med referencemetoden på bybaggrundsmålestationen). Månedsmiddelkoncentrationerne bestemt med referencemetoden viser stort set samme niveau hen over året. Den mindre sæsonvariation for PM_{10} end for $PM_{2,5}$ hænger sammen med, at det lokale bidrag fra trafikken er større for PM_{10} end for $PM_{2,5}$, og at der er en relativt begrænset variation i vejtrafikken hen over året. Der er dog en del variation fra måned til måned, hvilket hovedsageligt skyldes de naturlige variationer i de meteorologiske forhold. Sensoren giver til gengæld en betydelig sæsonvariation, og da sensoren her samtidigt generelt set måler for lavt (Afsnit 4.3), så bliver resultatet, at der for hovedparten af månederne er væsentligt forskel mellem månedsmiddelkoncentrationerne bestemt med sensorer og DCE's referencemetode.

Samlet set giver sensorerne en for stor variation hen over månederne, hvilket underbygger formodningen om, at sensorerne kunne være følsomme over for forandringer i de meteorologiske forhold. En mulighed er, at sensorerne påvirkes af den relative luftfugtighed. Den relative luftfugtighed er størst i vintermånederne og væsentligt mindre i sommermånederne, hvilket kunne forklare hvorfor koncentrationerne målt med sensorerne varierer mere hen over året end målt med DCE's referencemetode. I Figur 4.22 sammenlignes variationen af månedsmiddelkoncentrationen for $PM_{2,5}$ med variationen i den relative luftfugtighed. Sammenligningen viser, at en stor del af variationen i månedsmiddelkoncentrationen af $PM_{2,5}$ kan forklares ud fra variationen i den relative luftfugtighed.



Figur 4.21. Sammenligning mellem månedsmiddelværdier for PM₁₀ i 2021 med Sensor 217 og DCE's referencemetode (DCE-LVS) målt ved DCE's gademålestationen på Bane-gårdsgade.



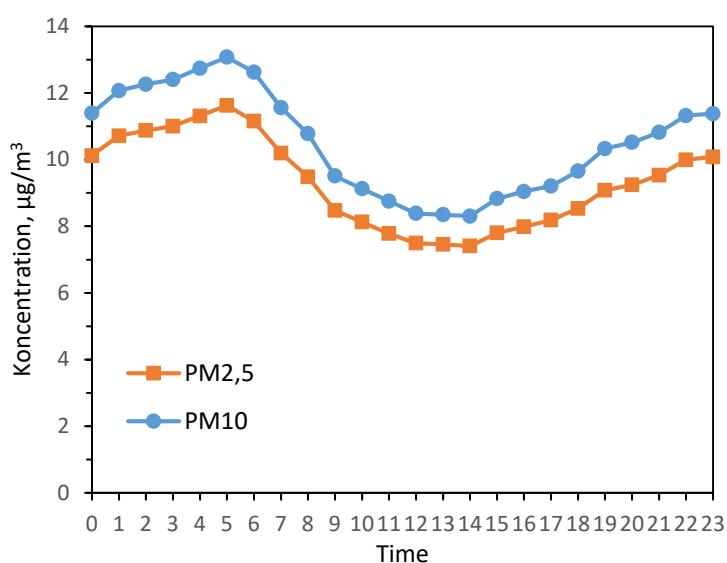
Figur 4.22. Månedsmiddelkoncentration af PM_{2,5} i 2021 målt med Sensor 218 ved bybag-grundsmålestationen ved Væksthusene i Botanisk Have sammenlignet med månedsmid-delkoncentration af den relative luftfugtighed. Data for den relative luftfugtighed er fra by-baggrund i Aalborg, da der ikke er fuld datadækning i Aarhus. Der er ikke væsentligt for-skel mellem månedsmiddelkoncentration målt i Aarhus og Aalborg.

4.8 Vurdering af den målte døgnvariation

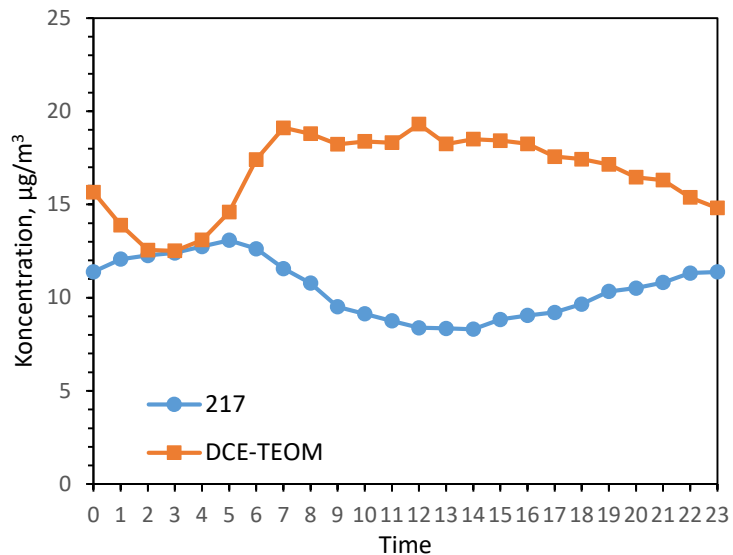
For yderligere at undersøge kvaliteten af resultaterne og for yderligere at kunne vurdere om sensorerne er påvirket af de meteorologiske forhold, så har vi også lavet en undersøgelse af den målte døgnvariation. Døgnvariationen er beregnet ved at beregne den gennemsnitlige koncentration time for time for hele kalenderåret. Dog har vi valgt kun at inkludere resultater fra hver-dage, da der på hverdage er et karakteristisk mønster i udledningerne. For eksempel er der stort set samme døgnrytme i trafikken fra mandag til fredag.

Figur 4.23 viser den gennemsnitlige døgnvariation for $PM_{2,5}$ og PM_{10} i 2021 målt med Sensor 217 ved gademålestationen på Banegårdsgade. Den gennemsnitlige timemiddelværdi er lavest midt på dagen (kl. 12:00-15:00) og højest tidligt om morgenen (kl. 5:00-6:00). Endvidere er døgnvariationen ens for $PM_{2,5}$ og PM_{10} . PM_{10} er blot omkring 20% højere end $PM_{2,5}$.

Denne døgnvariation afviger betydeligt fra den døgnvariation, som bliver målt med DCE's TEOM-metode. I Figur 4.24 sammenlignes den gennemsnitlige døgnvariation for PM_{10} i 2021 ved gademålestationen på Banegårdsgade målt med Sensor 217 med resultaterne fra DCE's målinger på timemiddelniveau med TEOM-metoden (Afsnit 2). DCE's TEOM-målinger giver et helt andet billede af døgnvariationen med højest koncentrationer i dagtimerne og de laveste koncentrationer sidst på natten. Årsagen til denne døgnvariation er, at trafikken på Banegårdsgade bidrager væsentligt til PM_{10} , og at vejtrafikken har den største intensitet i dagtimerne. Det er derfor tydeligt at sensor 217 måler en forkert døgnvariation for PM_{10} .



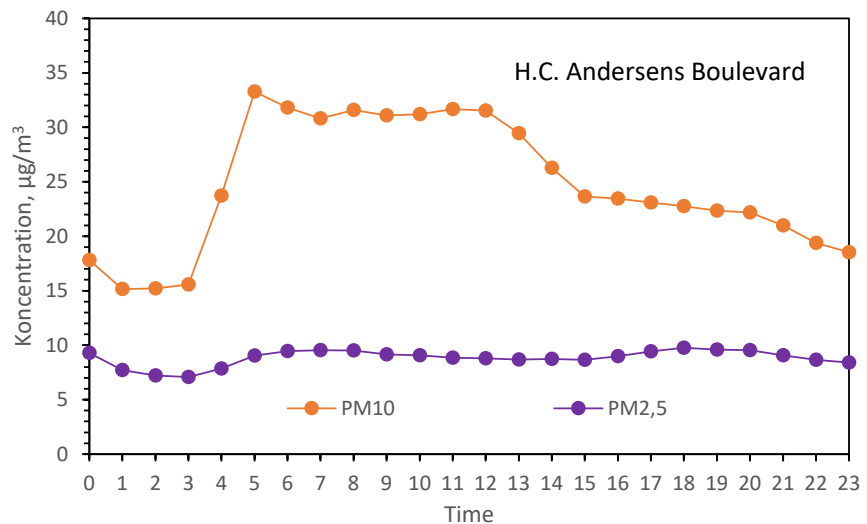
Figur 4.23. Døgnvariation i de årlige gennemsnitlige timemiddelværdier for $PM_{2,5}$ og PM_{10} i 2021 målt med Sensor 217 ved gademålestationen på Banegårdsgade. Data dækker kun hverdage.



Figur 4.24. Sammenligning mellem døgnvariation i de årlige gennemsnitlige timemiddelværdier for PM_{10} i 2021 målt med Sensor 217 og DCE's TEOM-metode (DCE-TEOM) ved gademålestationen på Banegårdsgade. Data dækker kun hverdage.

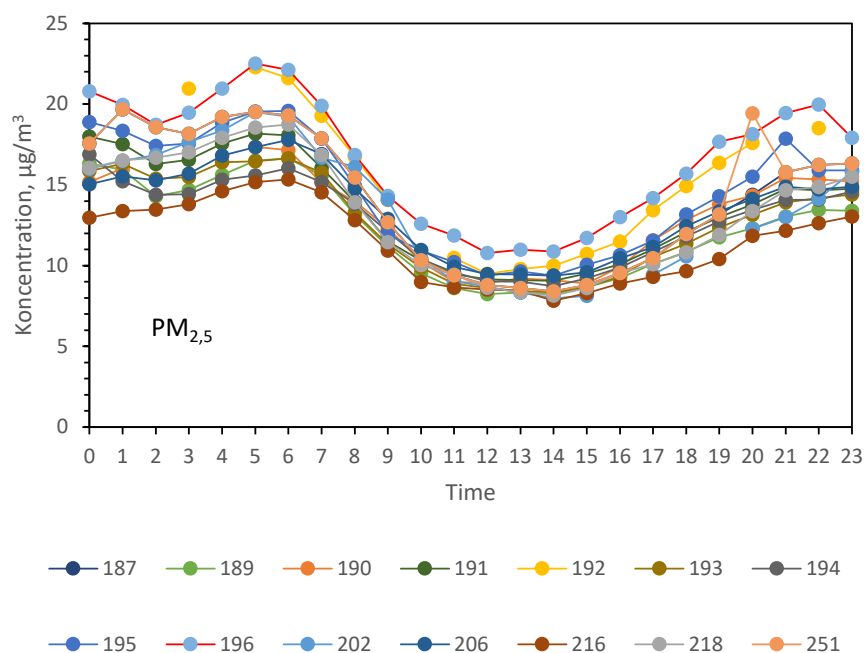
Resultaterne fra Sensor 217 angiver endvidere, at der er den samme relative døgnvariation for $PM_{2,5}$ og PM_{10} (Figur 4.23), hvorimod målingerne fra DCE angiver, at der er betydelig forskel mellem $PM_{2,5}$ og PM_{10} . Figur 4.25 viser døgnvariationen for $PM_{2,5}$ og PM_{10} baseret på målinger med TEOM-metoden ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København. Sensor 2.17 burde derfor have vist, at der var en forskel mellem døgnvariationen i $PM_{2,5}$ og PM_{10} . For $PM_{2,5}$ burde der være en relativ lille døgnvariation i $PM_{2,5}$ grundet det store bidrag fra langtransporteret partikelforurening og for PM_{10} burde der være en mere tydelig døgnvariation for PM_{10} afspejlende det relativt store bidrag til PM_{10} fra vejtrafikken.

Der foretages ikke målinger af timemiddelværdi (TEOM-metoden) af $PM_{2,5}$ i Aarhus, hvilket er grunden til, at der anvendes data fra København i Figur 4.25 for at illustrere dette forhold. Døgnvariationen for $PM_{2,5}$ og PM_{10} er relativt ens på gademålestationer i Danmark, fordi en stor del af partikelforureningen er langtransporteret, og fordi bidraget fra udledninger fra vejtrafikken varierer på den samme måde i løbet af døgnet i de store danske byer. Da trafikintensiteten er væsentligt større på H.C. Andersens Boulevard end på Banegårdsgade, så er der dog en mere markant døgnvariation på H.C. Andersens Boulevard end på Banegårdsgade.

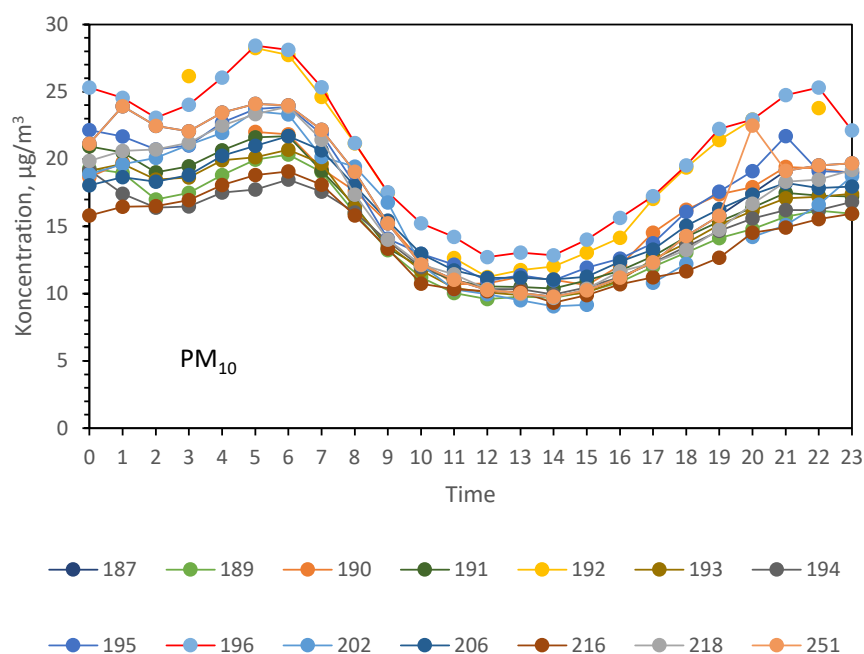


Figur 4.25. Døgnvariation i de årlige gennemsnitlige timemiddelværdier for PM_{2,5} og PM₁₀ i 2020 målt med DCE's TEOM-metode på gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København. Data dækker kun hverdage.

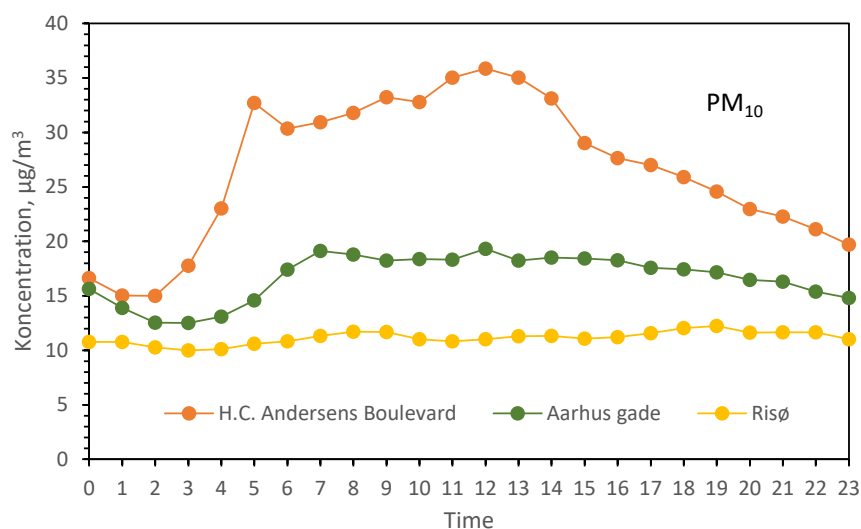
Montems sensorer måler en ensartet døgnvariation uafhængigt af lokaliteten, hvilket er illustreret i Figur 4.26 og Figur 4.27, som viser døgnvariationskurven for henholdsvis PM_{2,5} og PM₁₀ for de 14 sensorer, som har en acceptabel datadækning i 2021. Der er en vis variation i de absolutte niveauer, men variationsmønstret er stort set ens for alle sensorerne på trods af, at nogle af sensorerne er placeret i landlig baggrund (Sensor 202), forstad (Sensor 190 og 251) eller bybaggrund (Sensor 218) og andre ved stærkt trafikerede gader (de resterende sensorer). Dette er i modsætning til resultaterne fra DCE's målinger af døgnvariationen af PM₁₀ med TEOM-metoden (Figur 4.28), hvor der på målestationen i landlig baggrund ved Risø ses stort set uændrede koncentrationen gennem døgnet, og ved gademålestationerne i København og Aarhus ses væsentligt højere koncentrationer om dagen som følge af udledningerne fra trafikken.



Figur 4.26. Døgnvariation i de årlige gennemsnitlige timemiddelværdier for PM_{2,5} i 2021 målt med alle 14 sensorer, som har tilstrækkelig datadækning i 2021. Målested for sensorerne kan ses i Tabel 4.3. Data dækker kun hverdage.

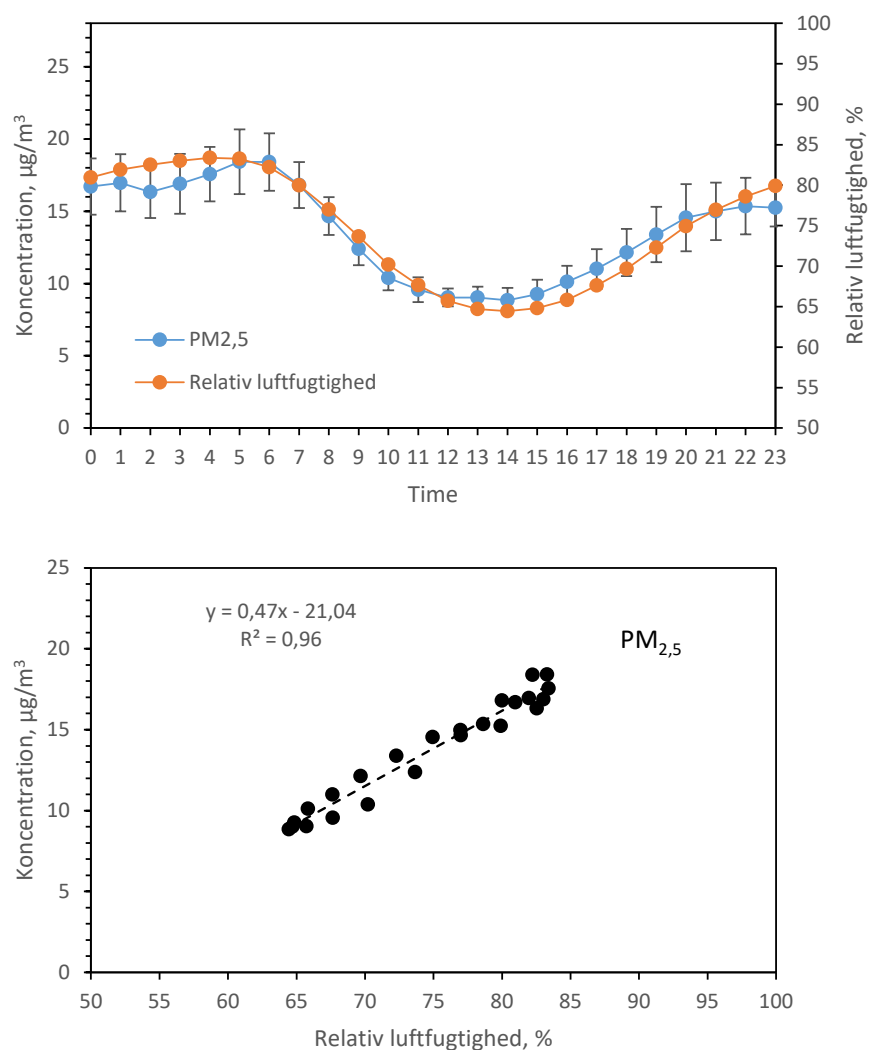


Figur 4.27. Døgnvariation i de årlige gennemsnitlige timemiddelværdier for PM₁₀ i 2021 målt med alle 14 sensorer, som har tilstrækkelig datadækning i 2021. Målested for sensorerne kan ses i Tabel 4.3. Data dækker kun hverdage.

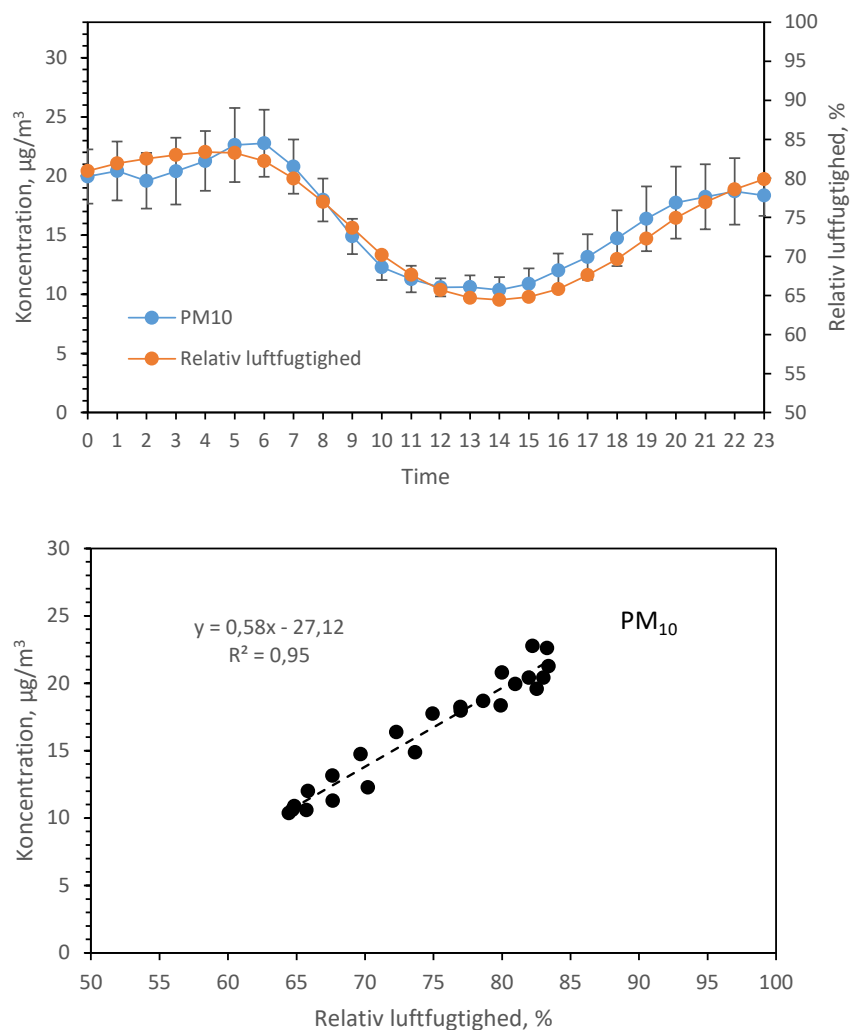


Figur 4.28. Døgnvariation i de årlige gennemsnitlige timemiddelværdier for PM₁₀ i 2021 målt med DCE's TEOM-metode ved gademålestationen på H.C. Andersens Boulevard i København, ved gademålestationen på Banegårdsgade i Aarhus og i landlig baggrund ved målestationen ved Risø, Roskilde. Data dækker kun hverdage.

Data for døgnvariationen målt med sensorerne og den manglende overensstemmelse med resultaterne fra DCE's målinger peger på, at sensorerne i høj grad er påvirket af andre faktorer end partikelkoncentrationen. Sæsonvariationen (Afsnit 4.7) indikerer, at sensorerne kunne være påvirket af variationer i den relative luftfugtighed, så derfor er der i Figur 4.29 og 4.30 lavet en sammenligning mellem døgnvariationen fra sensorerne og døgnvariationen af den relative luftfugtighed opgjort som gennemsnit for 2021. Den målte døgnvariation for PM_{2,5} og PM₁₀ svarer til døgnvariationen i den relative luftfugtighed, og der er en meget høj korrelation mellem de to datasæt for både PM_{2,5} ($R^2 = 0,96$) og PM₁₀ ($R^2 = 0,95$). Konklusionen er derfor, at den relative luftfugtighed influerer meget stærkt på sensorernes målinger, og at variationen i de målte resultater i højere grad kan forklares ud fra variation i relativ luftfugtighed end ud fra variationerne i koncentrationen af PM_{2,5} og PM₁₀.



Figur 4.29. Sammenligning mellem den gennemsnitlige døgnvariation i 2021 for sensormålingerne af PM_{2,5} og relativ luftfugtighed (øverst) og PM_{2,5} plottet som funktion af relativ luftfugtighed (nederst). For sensormålingerne vises et gennemsnit af resultaterne for alle 14 sensorer med tilstrækkelig datadækning i 2021. "Usikkerhedsinterval" angiver standardvariationen for resultaterne fra de 14 sensorer. På øverste graf vises koncentrationen af PM_{2,5} på venstre y-akse og relativ luftfugtighed på højre y-akse. Den sorte stiplede linje i nederste graf er tendenslinje beregnet med lineær regression. Data dækker kun hverdage.



Figur 4.30. Sammenligning mellem den gennemsnitlige døgnavariation i 2021 for sensormålingerne af PM_{10} og relativ luftfugtighed (øverst) og PM_{10} plottet som funktion af relativ luftfugtighed (nederst). For sensormålingerne vises et gennemsnit af resultaterne for alle 14 sensorer med tilstrækkelig datadækning i 2021. "Usikkerhedsinterval" angiver standardvariationen for resultaterne fra de 14 sensorer. På øverste graf vises koncentrationen af PM_{10} på venstre y-akse og relativ luftfugtighed på højre y-akse. Den sorte stiplede linje i nederste graf er tendenslinje beregnet med lineær regression. Data dækker kun hverdage.

5. Beskrivelse af løbende kvalitetssikringssystem

Den sidste del af projektet er en beskrivelse af et system til en løbende kvalitetskontrol af resultaterne fra sensorerne i Aarhus Kommunes netværk til overvågning af partikelforureningen i Aarhus og omegn. For at kunne lave en reel beskrivelse af et detaljeret kvalitetskontrollsystem, så kræves der en grundlæggende viden om sensorernes præstation, herunder viden om sensorernes præcision og nøjagtighed. Det har imidlertid vist sig, at sensorerne ikke er i stand til at give retvisende målinger af $PM_{2,5}$ og PM_{10} . Derfor har det ikke været muligt at lave et detaljeret system til gennemførelse af det løbende kvalitetskontrollsystem, hvilket langt hen ad vejen heller ikke ville give mening set i forhold til sensorernes manglende evne til at måle $PM_{2,5}$ og PM_{10} .

Derfor har vi i det følgende lavet en kortfattet kvalitativ beskrivelse af grundelementerne i et kvalitetskontrollsystem.

DCE's allerede eksisterende målestationer for PM_{10} og $PM_{2,5}$ med referencemetoden

Som grundlag for en løbende kvalitetskontrol af Montems sensornetværk af PM_{10} - og $PM_{2,5}$ -målinger i Aarhus og omegn, vil DCE's allerede eksisterende PM_{10} - og $PM_{2,5}$ -målinger med EU's referencemetode ved målestationerne ved Aarhus Banegårdsgade og Væksthusene ved Botanisk Have, Aarhus, blive anvendt. EU's referencemetode for PM_{10} - og $PM_{2,5}$ -målinger har været brugt i Aarhus siden 2013, og disse målinger indgår i det nationale overvågningsprogram for luft under NOVANA (se fx Ellermann et al. 2022).

Da bidragene til PM_{10} - og $PM_{2,5}$ -koncentrationerne i Danmark i høj grad er langtransporterede, er det yderligere en fordel for kvalitetskontrollen af Montems sensornetværk, at de referencemålinger, som danner basis for denne kvalitetskontrol, ikke kun er lokale men også målinger, der er evaluerede overfor DCE's generelle nationale målinger, og som derfor indgår både i en regional og landsdækkende sammenhæng. Ydermere er det en fordel, at basis for kvalitetskontrollen af sensorerne i Montems sensornetværk af PM_{10} - og $PM_{2,5}$ -målinger bygger på sammenligninger direkte op mod EU's referencemetode for PM_{10} - og $PM_{2,5}$, frem for en PM_{10} - og $PM_{2,5}$ -bestemmelse byggende på en ækvivalent metode, der jo kun er valid, hvis den er evalueret over for referencemetoden.

PM_{10} og $PM_{2,5}$ måles med referencemetoden på DCE's målestation på Banegårdsgade i Aarhus og repræsenterer partikelforureningsniveauet for en stærkt trafikeret gade.

På DCE's målestation ved Væksthusene, Botanisk Have, Aarhus, måles $PM_{2,5}$ ligeledes med referencemetoden og repræsenterer bybaggrundsniveauet for den fine fraktion af partikelforureningen. PM_{10} og $PM_{2,5}$ målt med referencemetoden på DCE's målestationer er bestemt som døgnmiddelværdier, hvilket er det krav, som der stilles for rapportering til luftovervågningsprogrammet og til EU.

Hyppighed og forløb af kvalitetskontrol af Montems sensormålinger

Den løbende kvalitetskontrol af Montems sensormålingerne er tænkt som udgangspunkt til at blive foretaget kvartalsvis, hvor et kvartals måleresultater kvalitetskontrolleres i løbet af de to første måneder efter, at kvartalet er afsluttet. Det vil sige, at målinger fx for perioden 1. januar – 31. marts vil være færdigkontrolleret pr. 1. juni, under forudsætning af kvalitetskontrollen af DCE's reference PM-målinger forløber planmæssigt, og at dataoverførslen fra de enkelte sensorer forløber problemfrit og til tiden.

Første trin i forløbet af den løbende kvalitetskontrol af Montems sensormålinger begynder med kvalitetskontrol af DCE's referencemetodemålinger, hvilket bliver foretaget i forvejen i forbindelse med den overordnede kvalitetskontrol af målingerne i det landsdækkende NOVANA målenetværk for luft. Referencemetoden bygger på vejeanalyser i laboratoriet af opsamlet partikulært materiale, hvilke typisk foreligger en måned efter, at de sidste partikelopsamlinger er blevet foretaget på den enkelte målestation, og kan af logistiske årsager derfor ikke blive foretaget før.

Andet trin i forløbet kan således påbegyndes omkring en måned efter periodens sidste PM-referencemetodemåling er blevet foretaget. Andet trin vil bestå i at holde Montems sensormålingerne, der først er blevet omregnet til døgnmiddelværdier, op mod DCE's referencemålinger for den pågældende periode, hvis tidsenhed er døgngennemsnit. Sensormålingerne vil blive vurderet i forhold til de forskellige stationskategorier, fx målinger som repræsenterer 'bybaggrund' eller 'stærkt trafikeret gade'. I vurderingen kan der indgå elementer som sensormålingernes nulpunktsforskydning og hældning i forhold til referencemålingerne, ekstremværdier, absolutte niveauer samt drift over tid i koncentrationsbestemmelserne.

Tredje trin i forløbet vil være at foretage en vurdering på basis af andet trin nævnt ovenfor, om Montems sensordata er af en sådan beskaffenhed, at de kan godkendes i kvalitetskontrollen inden for den måleusikkerhed de måtte have, og/eller om de eventuelt kan korrigeres og rettes op i forhold til målingerne fra referencemetoden. Men om dette kan lade sig gøre, vil afhænge af kvaliteten af Montems sensormålinger. Således vil Montems sensormålinger med deres usikkerheder taget i betragtning kunne placeres i typisk tre kategorier og vurderes som:

1. Acceptable målinger
2. Målinger med forhøjet usikkerhed
3. Uacceptable målinger

Det er med det nuværende videngrundlag om sensorerne ikke muligt at vurdere, om det er muligt at lave en efterfølgende justering af data for på den måde at korrigere for til eksempel systematiske afvigelser grundet selve kalibreringen af sensorerne.

Resultat af kvalitetskontrollen

Det var som udgangspunkt planen, at DCE skulle gennemføre den løbende kvalitetskontrol. DCE vil som resultat af kvalitetskontrollen angive en kvalitetsmærkning af de målte data, men DCE vil ikke lave en efterfølgende justering af resultaterne fra sensorerne. En eventuel justering af data vil skulle udføres af Montem eller dataejer.

6. Litteratur

DS/EN 2014: Luftkvalitet – Gravimetrisk standardmålemetode til bestemmelse af PM₁₀ eller PM_{2,5}-massekonzentration i svævestøv. DS/EN 12341 1. udgave 2014-06-02. Dansk Standard, Charlottenlund, Danmark.

EU, 2008: Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 on ambient air quality and cleaner air for Europe: Official Journal of the European Union L152/1.

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M., Massling, A., Bossi, R., Frohn, L.M., Geels, C., Jensen, S.S., Nielsen, O.-K., Winther, M., Poulsen, M.B., Monies, C. og Sørensen, M.B. 2022. Luftkvalitet 2020. Status for den nationale luftkvalitetsovervågning. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 144 s. - Videnskabelig rapport nr. 467.

Lagler, F., Barbieri, M., Borowiak, A. & Putaud, J.-P. 2019: Evaluation of the Field Comparison Exercise for PM₁₀ and PM_{2,5} Ispra, 18 January to 14 March 2018 – European Commissions Harmonisation Programme for Air Quality Measurements, EUR 29939 EN, Publication Office of the European Union, Luxembourg, 2019.

Montem 2022: CityProbe 2: Sensors and Precision (public). Dokument sendt til DCE fra Christian Østergaard Lauersen, 25. januar 2022-

Ottosen, T.-B. og Hansen, S.K. 2021: Validation of SPS30 and Piers sensors – City Probe 2. Report 968765, Teknologisk Institut, Aarhus, Danmark.

Bilag 1 Beskrivelse af målesteder

Navn	Sensor-nr.	Højde over vej (m)	Afstand til nærmeste vejbane (m)	Placering	Generel beskrivelse af området	Andre bemærkninger
Landlig baggrund						
Borum Byvej, Borum, Sabro	202	4 m	2 m	Borum Byvej 12	Stille vej, lille landsby.	
Forstad til Aarhus, beboelse, mindre trafikerede veje						
Østervænget, Tilst (oprindeligt kaldt Blomstervænget)	188	4 m	3 m	Østervænget 1	Åben, stille, rækkehuse og parcelhuse.	
Firkløvervej, Risskov	232	4 m	4 m	Firkløvervej 4	Noget trafik, gammelt villakvarter, større villavej, brændeovne.	
Olaf Rudes Vej, Højbjerg	253	4,5 m	4 m	Olaf Rudes Vej 40	Åbent område, 4-5 etagers boligblokke, stille vej.	
Pihlkjærvej, Højbjerg	252	4 m	2 m	Pihlkjærvej 22	Stille villavej, parcelhuskvarter.	
Risvang Allé, Aarhus	237	4,5 m	7 m	Risvang Allé 32	Gammelt villakvarter, åbent, relativ stor vej, stille.	Mangler data
Salonvejen, Risskov	190	4 m	3 m*	Salonvejen 1	Ved parkeringsplads med plads til mindst 30 biler. Cirka 200 m fra kysten.	*Ikke en egentlig vej men en tilkørsel til en parkeringsplads
Sødalsvej, Brabrand	251	4,5 m	2 m	Sødalsvej 9	Stille parcelhuskvarter.	
Thorsvej, Åbyhøj	239	4 m	1,5 m	Thorsvej 23	Blandet boligområde, fodboldbane.	Parkering langs vejen under sensor
Forstad til Aarhus, stærkt trafikerede veje						
Edwin Rahrs Vej	230	5,5 m	22 m	Edwin Rahrs Vej	Åbent område, trafikeret vej, 2-4 etages betonbygninger, beboelse, kontorer og indkøbscentre.	
Hasle Ringvej	293	-	-	-	Stærkt trafikeret ringvej, parcelhuskvarter, meget bred vej.	Fandt ikke sensoren ved besigtigelse d. 2-3 februar 2022.

Navn	Sensor-nr.	Højde over vej (m)	Afstand til nærmeste vejbane (m)	Placering	Generel beskrivelse af området	Andre bemærkninger
Randersvej/Skejbygårdsvej (oprindeligt kaldt Brendstrupgårdsvej)	192	4,5 m	7 m	Hjørnet mellem Randersvej og Skejbygårdsvej	Åbent område, relativt stærkt trafikeret vejkryds, 2-3 etages betonbygninger, virksomheder, kontorer.	Sensor tilsyneladende uden solpanel ved besigtigelse d. 2-3 februar 2022.
Bybaggrund i Aarhus						
Væksthuset	299	4 m	1 m*	Væksthuset, Botanisk Have	Bypark, Den Gamle By, 3 etagers boligblokke.	DCE baggrundsstation. *Ikke en egentlig vej men en leveringsindgang og parkeringsplads for ansatte ved væksthuse.
Væksthuset	218	4 m	1 m*	Væksthuset, Botanisk Have	Bypark, Den Gamle By, 3 etagers boligblokke.	DCE baggrundsstation. *Ikke en egentlig vej men en leveringsindgang og parkeringsplads for ansatte ved væksthuse.
Aarhus Centrum, beboelse, mindre trafikerede gader						
Klostergade	238	4 m	0,5 m	Klostergade 62	Mindre trafikeret smal bygade.	
Møllevangs Allé	233	4 m	0,5 m	Møllevangs Allé 127, placeret i lygtepæl i midterrabat.	Relativt åbent område, rækkehuse og 3 etagers boligblokke.	
Gadeniveau, stærkt trafikerede gader i Aarhus						
Banegårds-gade	217	4 m	1 m		Stærkt trafikeret, centrum, forretninger og beboelse 3 etager.	DCE gadestation
Banegårds-gade	288	4 m	1 m		Stærkt trafikeret, centrum, forretninger og beboelse 3 etager.	DCE gadestation
Søndre Ring-gade/ Christian Wærums Gade	195	4 m	8 m	Christian Wærums Gade 31	Trafikeret ringgade, boligområde 5-6 etager.	Ved buslomme
Vestre Ring-gade/ Hangøvej	189	4 m	7 m	Placeret ud til Vester Ringgade	Stærkt trafikeret ringvej, universitetsområde, boligblokke, kontorbygninger 2-5 etager.	
Randersvej/ Jens Christian Skous Vej	206	4 m	5 m	Placeret på Randersvej	Trafikeret indfaldsvej, universitetsområde, kontorbygninger 4-5 etager.	
Marselis Boulevard	191	4 m	0,2 m	Marselis Boulevard 34	Stærkt trafikeret, blandet boligområde 2-13 etager, parkeringspladser.	Mangler data
Nørrebrogade	216	4 m	3 m	Nørrebrogade 20k	Placeret i forlængelse af busø. Relativ stor indfaldsvej, 3 etagers boligblokke. Århus Universitet på modsatte side.	

Navn	Sensor-nr.	Højde over vej (m)	Afstand til nærmeste vejbane (m)	Placering	Generel beskrivelse af området	Andre bemærkninger
Nørreport	194	4 m	14 m	Nørreport 20	Placeret ved stikvej med parkering, Letbane løber i midten. Stor vej, relativ trafikeret.	
Randersvej (overfor Jens Christian Skous Vej)	196	-	-	-	Trafikeret indfaldsvej, universitetsområde, kontorbygninger 4-5 etager.	Mangler data. Fundt ikke sensoren ved besigtigelse d. 2-3 februar 2022.
Søndre Ringgade/Skanderborgvej	207	4 m	9 m	Placeret i krydset mellem Skanderborgvej og Sønder Ringgade.	Temmelig trafikeret stort vej-kryds, boligområde 5-6 etager.	
Strandvejen	193	4 m	1 m	Placeret tæt på krydset mellem Strandvejen og Marselis Boulevard (Ringvej 1).	Stærkt trafikeret, 2-3 etagers boligområde mod vest og åben havne og containerområde mod øst.	Høj skrænt op mod boligblokke mod vest.
Vestre Ringgade/Søren Frichs Vej	187	4 m	5 m	Placeret i krydset mellem Vester Ringgade og Søren Frichs vej.	Åbent område, stærkt trafikeret ringvej, kontorbygninger og indkøbscentre.	
Aarhus Havn						
Irma Peder-sens Gade	229	4,5 m	0,75 m	Placeret på Bernhard Jensens Boulevard	Nybygget 7-10 etager boligblokke i havneområde.	
Polensgade	275	4 m	0,4 m	Placeret på Kovnøgade	Industrihavn, lagerbygninger, ikke en regulær vej.	
Østhavnsvej	254	4,5 m	3 m		Industrihavn, ret trafikeret, færge og containerhavn, 60 m til vandet.	Dobbelt-sensor test
Østhavnsvej	204	4,5 m	3 m		Industrihavn, ret trafikeret, færge og containerhavn, 60 m til vandet.	Dobbelt-sensor test

KVALITETSVURDERING AF AARHUS KOMMUNES NETVÆRK TIL MÅLING AF PARTIKELFORURENING

DCE har for Aarhus Kommune gennemført en kvalitetsvurdering af Aarhus Kommunes netværk til overvågning af partikelforureningen i Aarhus og omegn. Overvågningen foretages af firmaet Montem, som har opsat 32 luftforureningssensorer fordelt i Aarhus og omegn. Overordnet set er netværket velstruktureret med passende geografisk fordeling af målesteder og god sammensætning af typer af målesteder. Vurdering af resultaterne fra sensorerne viste, at sensorerne ikke var i stand til at give retvisende resultater for $PM_{2,5}$ og PM_{10} ved de koncentrationsniveauer, som er gældende i Danmark. Endvidere blev det dokumenteret, at døgnvariationen bestemt med sensorerne i store træk kunne forklares ud fra døgnvariation i relativ luftfugtighed, og at der var store afvigelser fra døgnvariation målt med DCE's referencemetode.