
Måling af ultrafine partikler på forpladsen på Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejds miljø

Teknisk delrapport Foreløbige resultater

Thomas Ellermann og Andreas Massling

Danmarks Miljøundersøgelser ved Aarhus Universitet
November 2010

Indhold

Indledning	3
Partikelfraktioner	3
Målinger	4
Resultater	4
Litteraturundersøgelser	10
Foreløbige konklusioner	11
Referenceliste	12

Indledning

Nærværende rapport til Københavns Lufthavne A/S er udarbejdet i november 2010 af Danmarks Miljøundersøgelser ved Aarhus Universitet (DMU). Arbejdet er foretaget i forbindelse med Delprojekt 1 og 2 under DMU's projekt "Undersøgelse af luftforureningen på forpladsen på Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø". Denne undersøgelse udføres for Københavns Lufthavne A/S i perioden 2009 til 2011.

I forbindelse med Delprojekt 1 og 2 var det hensigten, at der skulle udføres to målekampanjer af i alt fire måneders varighed med måling af antal og størrelsesfordeling af ultrafine partikler ved målestationen på forpladsen (Gate B4) og ved én af Københavns Lufthavns to overvågningsstationer (Figur 1). Planen var at kampanjerne skulle finde sted forår og efterår 2010. Grundet større ombygninger ved gatene B2 og B4 i foråret 2010, blev målekampanjen i foråret udskudt, således at de to målekampanjer er blevet slået sammen til en samlet kampanje i efteråret 2010.

Rapporten giver først en kort gennemgang af nogle af de vigtigste partikelfraktioner, som indgår i den samlede undersøgelse af partikelforurening. Herefter præsenteres resultater fra måling af antal og størrelsesfordeling af ultrafine partikler på forpladsen og ved overvågningsstationen. Herefter suppleres med resultater hentet fra litteraturen og rapporten afsluttes med en konklusion. Såvel resultater som konklusioner er foreløbige, idet Delprojekt 1 og 2 endnu ikke er afsluttet.

Partikelfraktioner

Luftbåren partikelforurening består af mange forskellige typer partikler med varierende fysiske og kemiske egenskaber, hvoraf størrelse og kemisk sammensætning har betydning for partiklernes effekt på human sundhed. Derfor omfatter den samlede undersøgelse af luftforureningen på forpladsen målinger af en række forskellige parametre, som på hver sin måde er med til at karakterisere forskellige fraktioner af partikelforureningen.

PM_{2,5}

Angiver massen af partikler med en aerodynamisk diameter mindre end 2,5 µm (mikrometer = milliontedel meter); de såkaldt fine partikler. Massen af en partikel stiger meget kraftigt med diameteren, fordi volumen af en partikel stiger med diameter i tredje potens. PM_{2,5} vil derfor hovedsageligt afhænge af partikler med diameter mellem 0,5 og 2,5 µm. Forbrændingsprocesser, herunder udstødning, fører til dannelse af partikler, som bidrager til PM_{2,5}. PM_{2,5} kan også dannes i forbindelse med fx dækslid ved opbremsning af fly på landingsbanen. Der er dokumenteret sammenhæng mellem PM_{2,5} og sundhedsskadelige effekter. EU har derfor opstillet grænseværdi for PM_{2,5} i forbindelse med vurdering af luftkvalitet.

Ultrafine partikler

Forbrændingsprocesser giver udledninger af et stort antal meget små partikler med diameter under 100 nm (nanometer = milliardtedel meter). Disse partikler kaldes ultrafine partikler. De ultrafine partikler har en meget lille masse, så derfor karakteriseres de ultrafine partikler ved antal i stedet for masse. Antallet af ultrafine partikler er langt større end antallet af partikler med diameter fra 0,5-2,5 µm. Mange undersøgelser peger på, at netop de ultrafine partikler udgør den mest sundhedsskadelige andel af partiklerne, men sundhedseffekterne er langt fra færdigbelyst. Der er ikke opstillet grænseværdier for antallet af ultrafine partikler, og EU forventer ikke, at dette vil ske inden for de nærmeste år.

Sod

En ikke-flygtig fraktion af de ultrafine partikler består udelukkende af kulstof og betegnes enten som sod eller elementært kulstof (EC). Sod udgør en betragtelig del af partikelforureningen fra dieselmotorer og udledes også fra flymotorer. Sod menes at være sundhedsskadeligt, men der er ikke opstillet grænseværdier for sod i relation til luftkvalitet.

Denne rapport har fokus på de ultrafine partikler, mens PM_{2,5} og sod vil blive behandlet i den afsluttende rapport fra undersøgelsen.

Målinger

Målingerne af antallet og størrelsesfordeling af de ultrafine partikler på forpladsen på Kastrup Lufthavn blev begyndt i løbet af juli 2010, således at måleresultater findes fra august 2010. Målingerne blev foretaget ved målestationen placeret ved Gate B4 (kaldet Station B4) og ved Station Øst, som indgår i forbindelse med den løbende overvågning af luftkvaliteten ved randen af Kastrup Lufthavn. Placeringen af målestationerne er vist på Figur 1.

Målingerne af antal og størrelsesfordeling af ultrafine partikler foretages med DMU's Differential Mobility Particle Sizer (DMPS), som dækker partikelstørrelser fra 6-700 nm (mobilitets diameter), hvoraf det kun er partiklerne under 100 nm, som betegnes ultrafine. Målingerne foretages i scan af 2 minutters varighed, som aggregeres til ½-timesmiddelværdier. Indtaget til DMPS er placeret i ca. 2,5 m højde.

Målingerne på gadestationen på H.C. Andersens Boulevard (HCAB) og ved den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde er foretaget af DMU i forbindelse med den nationale luftkvalitetsovervågning og via partikelforskningsprojekt finansieret af Miljøstyrelsen.

Resultater

Figur 2 viser tidsserie for ½-timesmiddelværdierne af antallet af partikler målt på forpladsen (Station B4) og ved overvågningsstationen (Station Øst) samt ved gadestationen på H.C. Andersens Boulevard (HCAB), og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde. De to sidste stationer er medtaget som sammenligningsgrundlag. Der ses stor tidslig variation ligesom der er stor forskel mellem målestationerne. Det

fremgår tydeligt, at der var betydeligt højere antal partikler ved Station B4 end ved Station Øst. Ved Station B4 målt et partikelantal på op over 500.000 partikler/cm³, mens partikelantal for Station Øst maksimalt lå på omkring 130.000 partikler/cm³. Både Station B4 og Station Øst lå over antallet af partikler målt ved HCAB, hvor der maksimalt blev målt omkring 40.000 partikler/cm³. HCAB regnes for en af de mest forureneede gadestrækninger i København. Lille Valby lå med et maksimum på omkring 25.000 partikler/cm³ endnu lavere end de tre øvrige stationer. I gennemsnit for perioden fra 28.07.2010 til 30.09.2010 (Tabel 1) lå Station B4 omkring en faktor 3,6 højere end målt ved Station Øst og en faktor 4,4 højere end HCAB. Endvidere lå Station B4 næsten en faktor 10 højere end den regionale baggrund udenfor København.

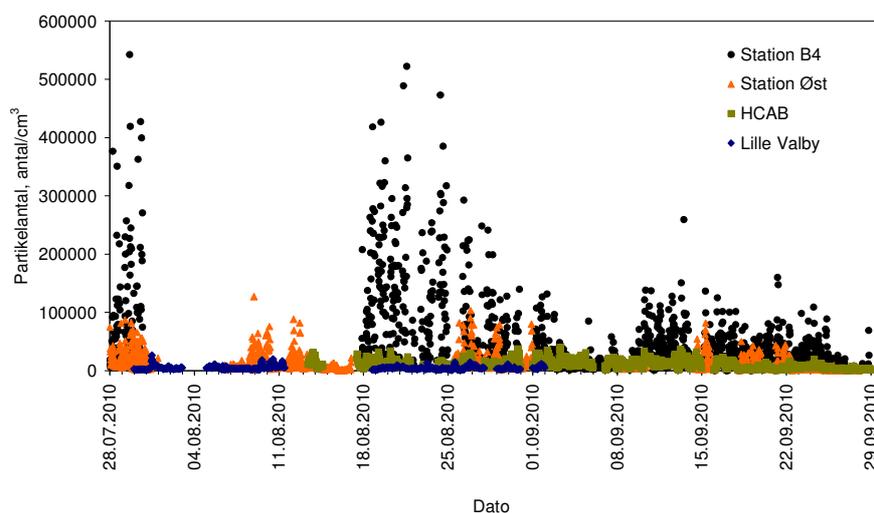


Figur 1. Placering af Station B4 og Station Øst.

Tabel 1 angiver også det gennemsnitlige antal partikler målt ved vejsiden på Holbækmotorvejen (Ellermann et al., 2008). Partikelantallet ved motorvejen ligger på omkring 50% af niveauet ved Station B4. Bemærk dog, at disse målinger er foretaget om foråret (marts-april 2008), hvor baggrunds niveauet for partikelantal er lidt højere end typisk for sensommer-efterår, hvor målekampagnen på lufthavnen er udført.

Tabel 1. Gennemsnitligt antal partikler målt ved Station B4, Station Øst, HCAB og Lille Valby i perioden fra 28.07.2010 til 30.09.2010. Endvidere angives resultater fra måling af partikelantal i forbindelse med målekampagne udført ved Holbækmotorvejen i marts-april 2008 (Ellermann et al., 2008).

Station	Gennemsnitligt antal partikler partikler/cm ³
Station B4	43.000
Station Øst	12.000
HCAB	9.800
Lille Valby	4.600
Holbækmotorvej	22.897



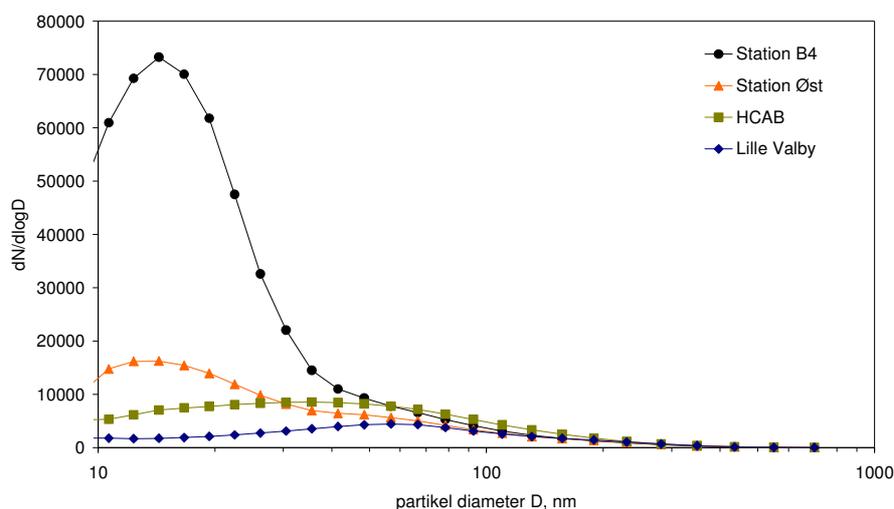
Figur 2. Samlet partikel antal ($\frac{1}{2}$ -times middelværdier) målt ved forpladsen (Station B4) og ved overvågningsstationen (Station Øst). Til sammenligning vises også resultater fra gadestationen HCAB og den regionale baggrundsstation Lille Valby, Roskilde, der indgår i det nationale overvågningsprogram for luftkvalitet.

Figur 3 viser den gennemsnitlige partikelstørrelsesfordeling, som det er praksis i forbindelse med videnskabelige publikationer inden for dette fagfelt. Partikeldiameteren er angivet på logaritmisk skala. For at få et retvisende indtryk af partikelstørrelsesfordelingen angives y-aksen i enheden $dN/d(\log D)$, hvor N er antal partikler og D er diameter. "d" angiver, at der er tale om afledede værdier. Således svarer den totale partikelkoncentration til arealet under kurven.

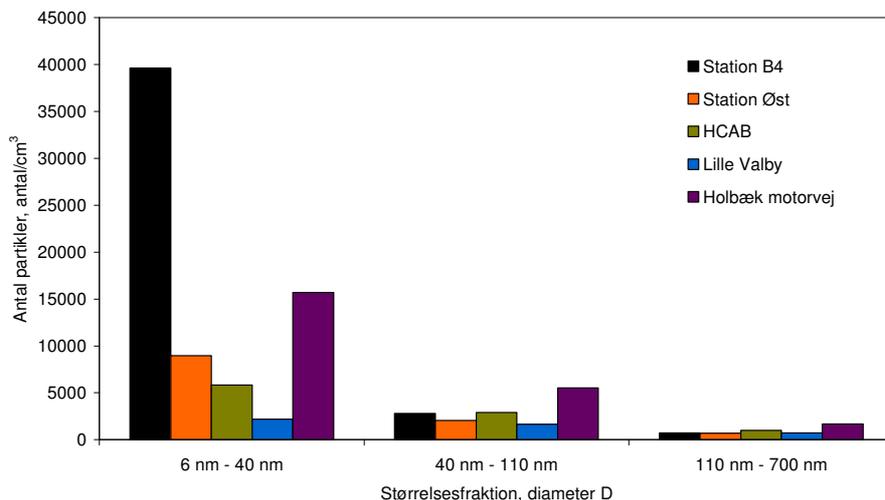
Figur 4 viser en simplere version af partikelstørrelsesfordelingen, hvor partiklerne er opdelt i tre størrelsesfraktioner:

- 6-40 nm, der indeholder de mindste partikler, som kan måles med instrumentet. Disse partikler udledes typisk direkte fra forbrændingsprocesser
- 40-110 nm, som bl.a. indeholder sodpartiklerne fra dieselmotorer.
- 110-700 nm, som for en stor del udgøres af langtransporterede partikler, hvoraf en del er sekundære uorganiske partikler dannet i atmosfæren ud fra bl.a. svovldioxid.

Af figur 3 og 4 ses det tydeligt, at det store antal partikler ved Station B4 skyldes et højt antal af de mindste partikler fra 6-40 nm. Station B4 lå endvidere betydeligt højere end de øvrige stationer. Således lå Station B4 4,5, 6,8 og 18 gange højere end henholdsvis Station Øst, HCAB og Lille Valby. Årsag til det meget høje antal for den mindste størrelsesfraktion ved Station B4 er formentlig hovedsageligt direkte udledninger fra jetmotorer (se afsnit om litteraturundersøgelser). Station Øst er også påvirket af disse udledninger enten via transport med vinden fra forpladsen eller som følge af udledningerne fra lettende eller landende fly.



Figur 3. Gennemsnitlig partikelstørrelsesfordelingen målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde. Målingerne er foretaget fra 28.07.2010 til 30.09.2010.



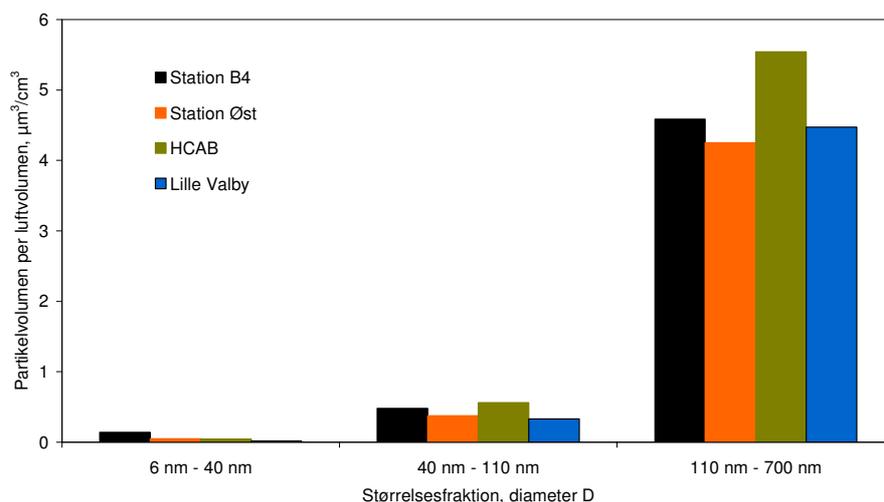
Figur 4. Gennemsnitligt antal partikler fordelt på tre størrelsesfraktioner målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde. Målingerne er foretaget fra 28.07.2010 til 30.09.2010. Endvidere vises målinger foretaget i forbindelse med målekampagne udført ved Holbækmotorvejen i marts-april 2008 (Ellermann et al., 2008).

For den mellemste størrelsesfraktion (40-110 nm) ses, at forskellen mellem Station B4, Station Øst, HCAB og Lille Valby var meget mindre. For disse fire stationer lå partikelantal højest på Station B4 og HCAB, som lå på samme antal partikler. Station Øst og Lille Valby lå henholdsvis ca. 30 og 40 % under Station B4.

For den største størrelsesfraktion (110-700 nm) lå niveauet for Station B4, Station Øst, HCAB og Lille Valby lavere end for de to mindre størrelsesfraktioner og niveauet var forholdsvis ens. HCAB ligger 30 % over de øvrige stationer, mens de tre andre stationer i praksis har samme niveau. Årsagen til dette er, at en stor del af partiklerne i denne størrelsesfraktion er langtransporterede og disse har derfor en jævn geografisk fordeling.

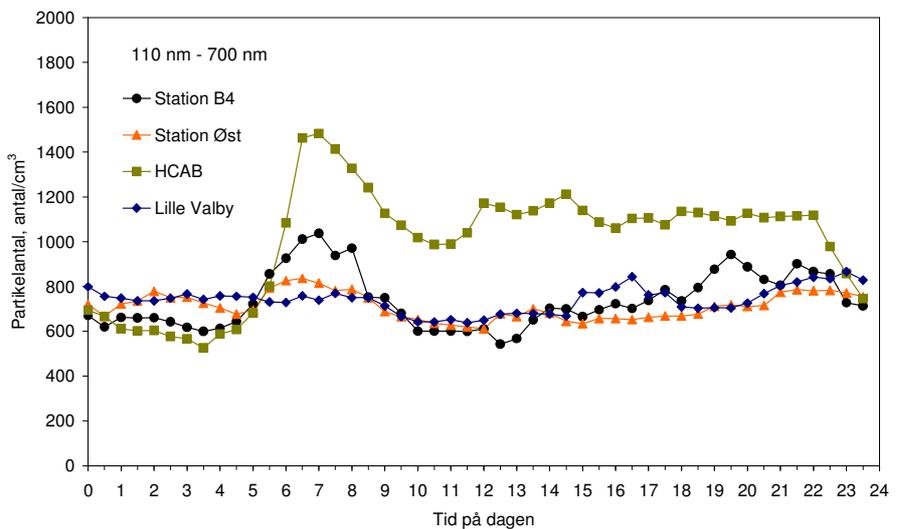
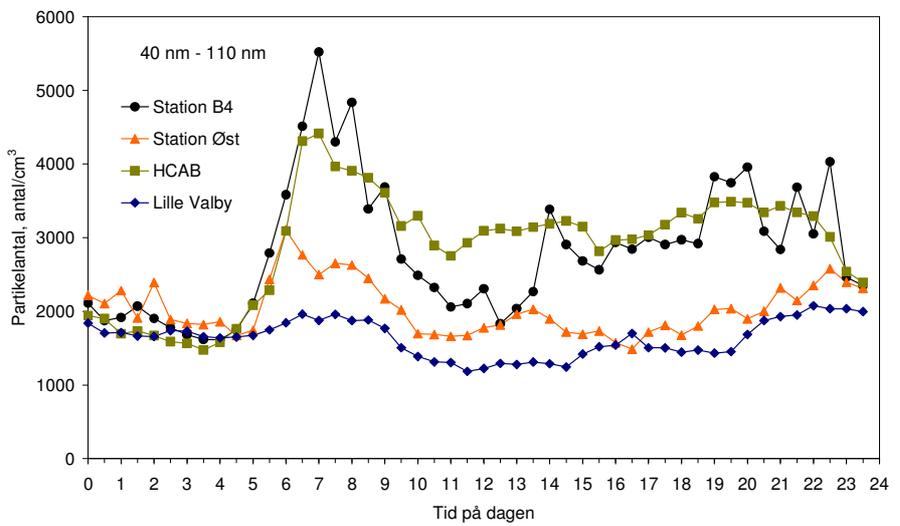
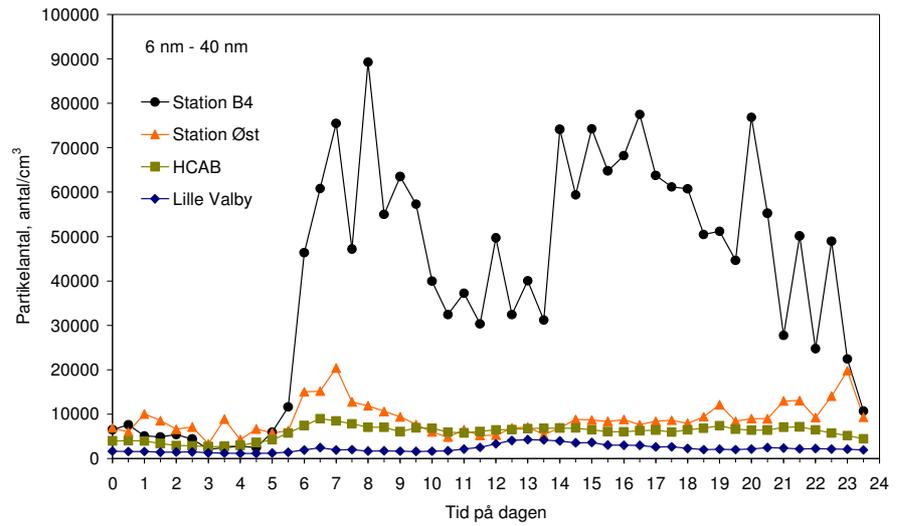
I Figur 4 vises endvidere data målt ved Holbækmotorvejen (Ellermann et al., 2008). Der ses, at det ved Holbækmotorvejen ligeledes er de meget små partikler (10-40 nm), som dominerer. Antallet er omkring 40% af antallet målt ved Station B4. Disse små partikler kommer udelukkende fra direkte udledninger fra udstødningen fra trafikken. For de større fraktioner ses større partikelantal ved Holbækmotorvejen end for de øvrige stationer. Dette skyldes formentlig for en stor del støv fra vej, dæk og bremses samt, at målingerne ved Holbækmotorvejen blev foretaget om foråret, hvor baggrundsniveauet er større end i sensommer og efterår.

I Figur 5 vises tilsvarende tal, som i Figur 4, men i stedet for partikelantal vises partikelvolumen. Ved at gange med partikeldensitet (omkring 1-1,5 g/cm³) kan volumen omregnes til partikelmasse. Partikelvolumen var størst for den store fraktion fra 110 - 700 nm. Det største volumen blev målt ved HCAB, mens Station B4 og Lille Valby lå omkring 20 % lavere. Station Øst lå ca. 28 % lavere end HCAB. Dette billede svarer til resultaterne fra måling af PM_{2.5} ved de fire målestationer, hvor forskellen mellem stationerne dog er noget større (data ikke præsenteret i denne rapport).



Figur 5. Gennemsnitligt partikelvolumen fordelt på tre størrelsesfraktioner målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde. Målingerne er foretaget fra 28.07.2010 til 30.09.2010.

Som et første trin mod at vurdere, hvor stort et partikelantal personalet på handlingspladserne udsættes for, har vi kigget på døgnvariationen af de tre størrelsesfraktioner (Figur 6). Da den gennemsnitlige døgnvariation kun er baseret på målinger fra to måneder er der en vis "støj" på døgnvariationen, som følge af de naturlige variationer i de meteorologiske forhold.



Figur 6. Gennemsnitlig døgnvariation for antal partikler fordelt på tre partikelstørrelser målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde. Målingerne er foretaget fra 28.07.2010 til 30.09.2010. Bemærk forskel i y-aksen for de tre figurer.

Ved Station B4 lå partikelantallet i dagtimerne i området fra 30.000 til 90.000 partikler/cm³, hvilket var betydeligt højere end for HCAB, hvor niveauet i dagtimerne lå på 5.000 til 10.000 partikler/cm³. Station Øst (5.000 - 20.000 partikler/cm³) lå lidt over niveauet for HCAB, mens Lille Valby lå lavest med under 5.000 partikler/cm³.

Ved Station B4 var der en markant døgnvariation for den mindste størrelsesfraktion (6 - 40 nm), hvor partikelantal om natten svarede til partikelantal ved baggrundsstationerne, mens det om dagen steg til 4-7 gange niveauet på baggrundsstationerne. Den gennemsnitlige døgnvariation ved Station B4 fulgte i store træk den forventede døgnvariation for antallet af flyoperationer i Kastrup. Dette underbygger, at det store partikelantal i denne størrelsesfraktion stammer fra udledningerne på forpladsen. På station Øst var der et meget mindre antal partikler og en mindre udpræget døgnvariation.

For den mellemste størrelsesfraktion (40 - 110 nm) svarede døgnvariation ved Station B4 ligeledes i store træk til den forventede døgnvariation i antallet af flyoperationer. Døgnvariationen ved Station B4 mindede også meget om døgnvariationen på HCAB, hvor der dog ikke var et markant fald omkring middagstid som for Station B4.

For den største størrelsesfraktion (110 - 700 nm) lå Station B4, Station Øst og Lille Valby på samme niveau og med næsten ingen døgnvariation. Dog var der en omkring 50% højere top om morgenen end om natten for Station B4. Den store lighed mellem stationerne peger på, at store dele af disse partikler kommer fra den regionale baggrund og at partiklerne hovedsageligt blev langtransporteret til Københavnsområdet. HCAB lå markant over de tre andre stationer. Dette skyldtes trafikgenererede partikler fra lokale kilder (bl.a. vejslid, dækslid, bremseslid).

Litteraturundersøgelser

Der er lavet en række undersøgelser af partikeludledningerne fra flymotorer. Disse har primært været fokuseret på udledningernes effekt på den frie troposfære, hvor flytrafikken foregår. Der har dog også været undersøgelser rettet mod udledningernes indflydelse på luftkvalitet i forbindelse med lufthavne. I det følgende opsummeres en række af de vigtige resultater fra disse undersøgelser:

- Flyjetmotorer udleder et stort antal partikler. Herndon et al., (2005) og Mazaheri et al. (2009) målte emissionsindeks for antal partikler (EI_n) på $3-50 \times 10^{15}$ partikler per kg brændstof.
- EI_n afhænger af motortype og af belastning af motor. EI_n er højest i forbindelse med tomgang (Herndon et al., 2005; Herndon et al., 2008; Mazaheri et al., 2009).
- Udledningerne er domineret af meget små partikler med diameter fra 10-40 nm (Mazaheri et al., 2008; Kinsey et al., 2010; Rogers et al., 2005).
- I røgfanen 80 m bag ved fly, der var i normal brug under taxi, blev der målt partikelantal (angivet i $dN/d(\log D)$) på omkring 1

$\times 10^6$ partikler/cm³ for partikler med diameter på omkring 20 nm (Mazahari et al., 2009). (Denne måde at angive partikelantal på svarer til Figur 3, hvor det ses, at vi for partikler med diameter på 20 nm målte et antal på 70.000 partikler/cm³ som ½-timesmiddelværdi).

Ud over disse målinger er der også lavet studier, som karakteriserer de fysiske og kemiske egenskaber af partiklerne. For eksempel testede Kinsey et al. (2010) en række forskellige motortyper og fandt, at 40 - 80 % af partikelmassen bestod af flygtige stoffer. Denne del af litteraturundersøgelserne er endnu ikke færdig.

Foreløbige konklusioner

Denne rapport præsenterer resultater fra måling af antal og størrelsesfordeling for ultrafine partikler på forpladsen på Københavns Lufthavn Kastrup. Målingerne er foretaget i perioden fra 28.07.2010 til 30.09.2010 ved Gate B4 og ved den østlige luftkvalitetsovervågningsstation.

Målingerne har vist, at antallet af partikler på forpladsen på Københavns Lufthavn Kastrup er stort sammenlignet med H. C. Andersens Boulevard. I måleperioden var partikelantallet i gennemsnit omkring 4,4 gange højere på forpladsen (43.000 partikler/cm³) end på H.C. Andersens Boulevard (9.800 partikler/cm³), som regnes for en af de mest luftforurenede gader i København. Antallet af partikler ved den østlige luftkvalitetsovervågningsstation (12.000 partikler/cm³) var på omkring 28% af niveauet målt på forpladsen, men var til gengæld omkring 22% højere end målt på H.C. Andersens Boulevard. Niveauet på forpladsen lå næsten en faktor 10 højere end målt i den regionale baggrund (Lille Valby, 4.600 partikler/cm³). Forskellen mellem partikelantal på forpladsen og ved den østlige luftkvalitetsovervågningsstation skyldes hovedsageligt, at udledningerne er koncentreret på forpladsen, og at udledningerne hurtigt fortyndes op via opblanding med den omgivende luft.

Den tidslige og geografiske variation i partikelantal er stor. Som ½-timesmiddelværdi kan partikelantallet på forpladsen være på over 500.000 partikler/cm³, hvor der på H.C. Andersens Boulevard kun er målt op til 40.000 partikler/cm³.

Måling af størrelsesfordeling af partiklerne har vist, at på forpladsen ligger omkring 90% af partiklerne i størrelsesfraktionen fra 6-40 nm. Omkring 8% af partiklerne ligger i størrelsesfraktionen fra 40-110 nm og kun omkring 2% ligger i størrelsesfraktionen fra 110-700 nm.

På forpladsen er den gennemsnitlige døgnvariation for antallet af partikler fra 6-40 nm stor. Antallet af partikler svarer om natten i store træk til baggrundsniveauet på omkring 5.000-10.000 partikler/cm³, mens det gennemsnitlige antal om dagen ligger på mellem 30.000 og 90.000 partikler/cm³. Den gennemsnitlige døgnvariation svarer i store træk til den forventede døgnvariation i flyoperationer på Københavns Lufthavn Kastrup.

Litteraturundersøgelser har vist, at flyjetmotorer udleder et stort antal partikler med diameter under 40 nm. I røgfanen fra flyjetmotor blev der 80 m efter motoren målt et stort antal partikler, som lå over det niveau, der blev målt ved målestationen på forpladsen.

Målinger og litteraturundersøgelser peger på, at flymotorerne bidrager i stort omfang til forureningen med ultrafine partikler på forpladsen. Hvor stor en andel, som kommer fra dieselskøretøjerne på forpladsen er endnu ikke færdigbelyst.

Målingerne af antallet af ultrafine partikler er endnu ikke afsluttet. Derfor er de ovenstående konklusioner foreløbige konklusioner baseret på de første to måneders undersøgelser.

Vi har endvidere ikke afsluttet vores arbejde omkring vurdering af de kemiske egenskaber for partiklerne på forpladsen. Dels er vi fortsat i gang med de kemiske målinger af organisk luftforurening på forpladsen. Og dels skal litteraturundersøgelserne omkring partiklernes kemiske egenskaber udvides.

Referenceliste

Ellermann, T., Solvang Jensen, S., Ketznel, M., Løfstrøm, P. and Massling, A. (2009): Measurements of air pollution from a Danish highway. National Environmental Research Institute, Aarhus University. 45 p.- Research Notes from NERI No. 254. <http://www2.dmu.dk/Pub/AR254.pdf>

Herndon, S.C., Jayne, J.T., Lobo, P., Onasch, T.B., Fleming, G., Hagen, D.E., Whitefield, P.D., and Miake-Lye, R.C. (2008): Commercial aircraft engine emissions characterization of in-use aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. *Environ. Sci. Technol.* 42, 1877-1883.

Herndon, S.C., Onasch, T. B., Frank, B.P., Marr, L.C., Jayne, J.T. Canagaratna, M. R., Grygas, J., Lanni, T., Anderson, B.E., Worsnop, D., and Miake-Lye, R.C. (2005): Particulate emissions from in-use commercial aircraft. *Aerosol Science and Technology*, 39: 799-809.

Kinsey, J.S., Dong, Y., Williams, D.C., and Logan, R. (2010): Physical characterization of the fine particle emissions from commercial aircraft engines during the aircraft particle emissions experiment (APEX) 1-3. *Atmospheric Environment*, 44, 2147-2156.

Mazaheri, M., Johnson, G.R., and Morawska, L. (2009): Particle and gaseous emissions from commercial aircraft at each stage of the landing and takeoff cycle. *Environ. Sci. Technol.*, Vol. 43, No. 2, 441-446.

Rogers, R., Arnott, P., Zielinska, B., Sagebiel, J., Kelly, K.E., Wagner, D., Lighty, J.S., and Sarofim, A.F. (2005): Real-time measurements of jet aircraft engine exhaust. *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 55:583-593.