



Kort sammendrag af *Litteraturstudie om helbredseffekter af flyemissioner*

Indledning

Beskæftigelsesministeren bad i juni 2019 NFA om at kortlægge og undersøge den eksisterende internationale forskning om helbredseffekter af flyemissioner. Baggrunden var blandt andet, et videnskabeligt studie fra NFA, som har bidraget med ny viden om lufthavnspartiklers toksicitet. Studiet viste, at partikler opsamlet i danske lufthavne har samme fysisk-kemiske egenskaber som dieseludstødningspartikler. Desuden var de toksiske effekter i mus sammenlignelige med de toksiske effekter af dieseludstødningspartikler og rene kul-nanopartikler. Forsøg med mus er en veletableret model for studier af helbredseffekterne af partikler på mennesker. Resultaterne er publiceret i det videnskabelige tidsskrift *Particle and Fibre Toxicology* i juni 2019.

3. marts 2020

J.nr.:
2018/20-1:

e-post:
pej@nfa.dk

På baggrund af en systematisk litteraturgennemgang har NFA udarbejdet et engelsk manuskript med henblik på fremtidig publicering i et videnskabeligt tidsskrift. Det engelske manuskript er bedømt af eksternt lektør. Indeværende notat er en kortere dansk opsummering af indholdet i det engelske manuskript.

Baggrund

Ligesom andre forbrændingsmotorer, producerer flymotorers forbrænding af jetbrændstof kulpartikler med associerede tjærestoffer (PAH) samt metaller og gasser¹. Ufuldstændig forbrænding af fossile brændstoffer, inklusive flybrændstof, resulterer i dannelsen af kulstof-baserede affaldsprodukter og kondenserede stoffer kaldet sod. Sodpartiklerne kan på grund af deres størrelse betegnes som procesgenererede nanopartikler, ligesom dieseludstødningspartikler. Udledningen kan bestemmes ved at måle niveauet af elementært carbon (EC) eller black carbon (BC). Terminologien afhænger af målemetoden, men i begge tilfælde måles indholdet af uorganisk kulstof i partiklerne. Generelt har forbrændingspartikler inklusive flyemissionspartikler et stort indhold af uorganisk kulstof, men indholdet kan variere noget efter brændstoftype og motorens forbrænding, dvs. om flyet er i taxi-, take-off-, opstignings- eller landingsfase. Analyser af partikler direkte fra jetmotorer og i lufthavne tyder på, at lufthavnspartikler er mindre end dieseludstødningspartikler².

Resultat af litteraturgennemgangen

Der blev foretaget en systematisk litteratursøgning som resulterede i 421 artikler. Yderligere 62 artikler blev identificeret ved andre søgninger. Til brug for overblik og baggrundsviden om målinger i luften omkring lufthavne har vi gennemgået fem store review-artikler, som sammenfatter viden fra blandt andet studier udført i store internationale lufthavne, hvor emissionerne måles løbende, heriblandt London

¹ CO₂, NO_x, CO, SO_x m.fl.

² Dieseludstødningspartikler er typisk 60-100 nanometer (en milliardtedel af en meter = nm) og flypartikler er mindre, helt ned til under 20 nm.

Heathrow, Amsterdam Schiphol, Lisabon, Rom, Los Angeles LAX og andre lufthavne i USA.

En gennemgang af den fremsøgte litteratur viste, at knap 100 artikler var relevante for vores videnskabelige litteraturstudie, og at disse var fordelt på 50 artikler om fysisk og kemiske egenskaber af lufthavnsemissioner og 47 om helbredseffekter (se tabel 1). Det samlede billede af de knapt 100 studier er, at de generelt peger i samme retning, hvilket igen tyder på, at der er generelt er videnskabelig enighed, om de konklusioner som kan udledes.

Tabel 1. Oversigt over studiernes fordeling på de forskellige områder:

Artikler om lufthavnspartiklers fysiske og kemiske egenskaber:	50
Artikler om helbredseffekter af flybrændstof:	15
Artikler om helbredseffekter af lufthavnspartikler:	
celle- og dyrestudier:	5
eksponering og helbred for populationer omkring lufthavne:	9
eksponering og helbred for lufthavnspersonale:	18

Gennemgangen af denne litteratur viser, at 32 studier undersøger helbredseffekter af lufthavnsemissioner direkte i mennesker eller i celle- og dyrestudier. I biomoniteringsstudier³ af lufthavnsansatte og i de epidemiologiske studier af folk, der bor i nærheden af en lufthavn, er personerne både udsat for partikler og gasser, der stammer fra lufthavnen (dvs. både fly og hjælpekedetøjer) og fra den generelle luftforurening (baggrundsforureningen). Designet af studierne er afgørende for, om der kan skelnes mellem effekter, der kan tilskrives lufthavnsemissioner og effekter af baggrundsluftforurening eller andet. For studierne udført på celler og dyr gælder det, at partiklerne er opsamlet enten direkte fra flymotorerne i test-faciliteter eller i lufthavne, enten tæt på tændte flymotorer eller på forpladsen med aktive fly. Her kan de observerede effekter tilskrives partiklerne. Afhængig af hvor og hvornår prøven er opsamlet vil flyemissionerne være den eneste eller den væsentligste komponent.

Eksponeringsrisiko for de ansatte i lufthavne

Knap 20 studier fra meget forskellige lufthavne i bl.a. Italien, USA, Holland og Kina har i nogen grad fokus på lufthavnsansatte. Studier med beskrivelser af arbejdspladseksponeringer og målinger af biomarkører (fx indikatorstoffer i blod og urin) viste generelt, at der i lufthavnene var udsættelse for øgede niveauer af partikler, sodpartikler i nanostørrelse samt øgede niveauer af tjærestoffer med kræftfremkaldende potentiale. Biomarkørerne i urinprøver viste, at lufthavnsansatte havde forhøjet udsættelse for tjærestoffer og brændstof, og celler fra blod og mundskrab viste øgede niveauer af DNA-skade, hvilket er en indikator for kræftisiko.

Der kan gennemgående fremhæves tre karakteristika, som er vigtige i forhold til risikoen for erhvervsmæssig udsættelse for partikler for lufthavnsansatte:

³ Ved biomoniteringsstudier måler man kroppens optag eller påvirkning af kemiske stoffer i fx blod eller urin.

1. *Afstand*. Tændte flymotorer er den største kilde til partikler i nanostørrelse i lufthavne. Afstand til emissionskilden (flymotorer) er en vigtig faktor for eksponeringsniveauer for lufthavnsansatte. Niveauerne er højere, jo tættere man er på tændte flymotorer og jo mere man færdes i vindretningen fra fly.
2. *Motortilstand*. Tændte flymotorer udleder store mængder partikler i nanostørrelse, men der er stor variation i emissionsniveauer over tid og flyenes motortilstande har betydning for mængden og typen af partikler. Høje partikel-niveauer kædes typisk sammen med start og landing af fly. Høje niveauer af tjærestoffer i partiklerne kædes sammen med tomgangstilstand ("ground-idle"), hvor flyet er holdende på jorden med tændt motor.
3. *Jobfunktion*. Der er store forskelle i eksponeringsniveauer mellem forskellige personalegrupper i lufthavne. Lufthavns-personale kan grupperes i *lav-risiko* (kontorarbejde og andre indendørs funktioner længst væk fra flyene), *mellem-risiko* (catering/rengøring/flysikkerhed med nogen kontakt med flyområdet) og *høj-risiko* (personale som håndterer bagage/mekanikere/klarmeldere og derfor færdes meget i flyområdet på forpladsen).

Toksikologiske studier i dyr og celler

En risikovurdering omfatter både omfanget af de arbejdsmiljø-mæssige udsættelser og farligheden af udsættelserne. Ud over biomonitoringsstudierne, blev der identificeret fem studier, der havde fokus på at afdække de toksiske effekter af flyemissionspartikler i dyr og cellekulturer.

Celle- og dyrestudier kan bruges til at klarlægge mekanismen bag sygdomsfremkaldende effekter og mulige årsagssammenhænge. Der blev ikke identificeret andre studier af toksiske effekter af fly-emissioner i dyr end muse-studiet fra NFA som viste, at lungeeksponering for lufthavns-partikler påvirkede immunsystemet⁴ og DNA-skade i samme grad som diesel-udstødningspartikler og rene kul-nanopartikler. Dieseludstødningspartikler og kul-nanopartikler er klassificeret som henholdsvis kræftfremkaldende for mennesker og muligvis kræftfremkaldende af WHO's kræftagentur, IARC.

Litteraturgennemgangen identificerede fire studier, hvori opsamlede lufthavns-partikler er blevet undersøgt i cellemodeller. Forskellige celletyper blev anvendt i hver af de fire studier. Ét cellestudie viste, at lufthavns-partikler kan påvirke immunsystemet (øge aktiveringen af inflammatoriske celler og signaleringsveje), og derved øge følsomheden overfor anden luftforurening og sygdomsfremkaldende mikroorganismer. Øvrige cellestudier viste, at lufthavns-partikler forårsager dannelse af reaktive oxygenforbindelser og inflammation. Disse resultater understøtter sammen med dyrestudiet, at lufthavns-partiklerne bl.a. kan være årsag til inflammation, DNA-skader og såkaldt akutfaserespons, som kan forøge risikoen for luftvejssygdomme, kræft og hjertekarsygdomme. Lufthavns-partikler har dermed helbredseffekter, som er

⁴ Undersøgt som graden af inflammation og akutfaserespons i musene.

sammenlignelige med andre trafikemissionspartikler, som for eksempel dieseludstødningspartikler. I dyre og celle-studierne er der både undersøgt partikler opsamlet under test-situationer, hvor partiklerne udelukkende stammer fra flymotorer og partikler opsamlet i lufthavne, hvor partiklerne stammer fra både fly, hjælpekedretøjer og baggrundsforurening. Der ses ikke væsentlige forskelle i de biologiske respons. Samlet set tyder dyre- og celle studier på, at partikler fra fly og lufthavnsemissioner forårsager de samme effekter, som ses i studier af mennesker.

Beboelsesområder nær lufthavne

Epidemiologiske studier af den generelle befolkning i nærheden af lufthavne viser, at afstand til lufthavn og vindretning har stor betydning for eksponeringsniveauer for lufthavnsemissioner i den generelle befolkning. Antallet af fly og andre lokale forhold har også betydning. Der er i litteraturgennemgangen identificeret ni studier, som har undersøgt, hvordan lufthavnsemissioner påvirker det omgivende miljø og bidrager til luftforurening og potentielle helbredseffekter på beboere omkring lufthavne.

To studier af henholdsvis tre lufthavne i staten New York og et stort område, der dækker de 12 største lufthavne i Californien, viste, at lufthavnsemissioner var associeret med et øget antal af hospitalsindlæggelser for astma og andre lungesygdomme samt hjertekarsygdomme, særligt i følsomme grupper som børn under 5 år, ældre over 65 år og socialt belastede borgere. En hollandsk rapport om Schiphol lufthavn ved Amsterdam viste, at skolebørn og voksne indtog mere medicin og havde øgede luftvejssymptomer på dage, hvor de var eksponeret for øgede emissioner fra lufthavnen. Den hollandske rapport konkluderer, at helbredseffekter af lufthavnsemissioner er sammenlignelige med helbredseffekter af andre trafikemissioner.

Et biomonitoringsstudie undersøgte effekten af udsættelse for lufthavnsemissioner hos frivillige forsøgspersoner med astma, som blev rekrutteret til at gå en tur i en zone med høje emissioner fra Los Angeles lufthavn sammenlignet med, når de samme forsøgspersoner gik en tur i et område uden lufthavnsemissioner. Forsøgspersonerne havde højere blod-niveauer af biomarkører for inflammation efter gåturen i lufthavnen sammenlignet med efter en gåtur i et område uden lufthavnsemissioner. Disse resultater tyder på, at eksponering for lufthavnsemissioner påvirker luftvejene og igangsætter en betændelsesreaktion i kroppen, som vides at bidrage til astma, lungesygdom og hjertekarsygdom.

Perspektiv og konklusion

Lufthavnsemissioner er en meget kompleks blanding af partikler og gasser. En stor del partiklerne er proces-genererede nanopartikler, som udledes fra tændte flymotorer. Man kan måle flyemissioner på flere måder. Det mest almindelige er at måle antallet af partikler (partikel-koncentrationen) eller den samlede masse (vægt) af partikler i luften. Der er ikke grænseværdier for flyemissionspartikler som sådan eller for eksponering for partikler i nanostørrelse i Danmark eller EU. Enkelte EU-lande, Tyskland, Holland og Finland, har indført en ikke-helbedsbaseret referenceværdi⁵ på

⁵ For uopløselige nanomaterialer med lav densitet, som f.eks. kulstof-baserede nanopartikler.

40.000 partikler/cm³, som er en frivillig aftale mellem arbejdsmarkedets parter, og virksomhederne derfor ikke er forpligtet til at overholde. Referenceværdien gælder bl.a. for kulstof-baserede nanopartikler og herunder således også flyemissionspartikler. Tabel 2 viser eksempler på partikel-koncentrationer fra forskellige studier. Typen af målinger og de målte partikel-koncentrationer varierer meget og kan ikke umiddelbart sammenlignes. Det ses dog generelt, at de rapporterede eksponeringsniveauer i lufthavne er høje for jobtyper, som er i nærheden af tændte flymotorer (fx personale som håndterer bagage, catering-chauffører og klarmeldere). Dette gælder også for danske studier.

Tabel 2. Eksempler på målte partikelkoncentrationer på forpladser eller som personlige målinger⁶ i danske studier og på tværs af studier.

Målte gennemsnitlige niveauer på forpladser (fra flere studier og flere lande):	10.000 – 20 millioner partikler/cm³
Gennemsnitlige niveauer ved personlige målinger af ”klarmeldere” og ”hangar operator” (flere studier og flere lande):	17-25.000 partikler/cm ³
Gennemsnitligt målt niveau, når jetjager letter og lander (personlige målinger hos klarmeldere på dansk flyvestation):	1,2 millioner partikler/cm ³
Målt niveau i DK 2014 for bagagemedarbejdere (gennemsnit for en arbejdsdag):	37.000 partikler/cm ³
Målt niveau i DK 2014 for medarbejdergrupper, der færdes på forplads (catering-chauffører, sikkerhedspersonale mv) (gennemsnit for en arbejdsdag):	12.000-20.000 partikler/cm ³
Målt niveau i DK 2014 for kontomedarbejdere (gennemsnit for en arbejdsdag):	5.000 partikler/cm ³

Samlet set er der i lufthavne i Danmark, Italien og Frankrig rapporteret eksponeringsniveauer på op til 20 millioner partikler/cm³ i indåndingszonen hos lufthavnspersonale. I et dansk studie fra 2014 var den gennemsnitlige partikelkoncentrationen over en arbejdsdag målt i indåndingszonen hos bagagemedarbejder i lufthavnen lige under den hollandske referenceværdi. Til sammenligning var partikelkoncentrationen hos kontomedarbejdere indendørs 5.000 partikler/cm³.

⁶ Forsøgspersoner har båret mobilt måleudstyr, som måler udsættelsen [for partikler] i indåndingszonen.

En række studier har målt eksponeringsniveauer af lufthavnsemissioner på basis af massen (dvs. vægten) af partikler, hvilket gør det muligt at sammenligne med grænseværdier i arbejdsmiljøet. I NFA's studie fra 2019 var eksponeringsniveauerne generelt under de relevante danske grænseværdier for forskellige delkomponenter i flyemissionspartikler⁷. Selvom en grænseværdi for dieselpartikler, formelt set ikke vil gælde for flyemissioner, er det fra et fagligt synspunkt relevant at sammenligne flyemissionspartikler med dieselgrænseværdier. EU har besluttet en ny grænseværdi for dieseludstødning på 50 mikrogram⁸ EC/m³ (elementært carbon = sod), som vil være gældende fra februar 2023. 'Health Council of the Netherlands' har publiceret en helbredsbaseeret grænseværdi for dieseludstødningspartikler målt som EC, hvor de angiver et risikoniveau (*prohibition risk level*) for dieseludstødningspartikler på 1,03 mikrogram EC/m³ svarende til at 4 ud af 1000 statistisk set vil få lungekræft som følge af erhvervsmæssig eksponering gennem et helt arbejdsliv ved en 8 timers daglig udsættelse svarende til denne værdi i 40 år uden brug af beskyttelsesforanstaltninger som personlige værnemidler. Et studie målte partikel-eksponeringen i 12 forskellige lufthavne fordelt på 41 flyvninger og rapporterede et gennemsnitligt niveau på ca. 4 mikrogram EC/m³ på forpladsen (boarding-området), hvilket er knap 4 gange over *prohibition risk level* for dieseludstødningspartikler, som angivet af 'Health Council of the Netherlands', men betydeligt under EU's grænseværdi for diesel.

Sammenfattende viser litteraturgennemgangen, at flyemissioner på flere måder er sammenlignelige med andre trafikemissioner inklusiv dieseludstødningspartikler. Partiklerne er proces-genererede nanopartikler og ligner hinanden fysisk og kemisk, dog med en forskel i størrelse. Endvidere understøtter litteraturen, at flyemissionspartikler har samme helbredseffekter, som man ser efter udsættelse for dieselpartikler og andre trafikemissioner. Det betyder, at flyemissionspartikler formentlig er kræftfremkaldende og at de også kan forårsage andre helbredseffekter på linje med luftforurening fra trafik. Samlet set viser målinger i og omkring lufthavne og biomoniteringsstudier, at nogle ansatte udsættes for potentielt helbredskadende partikler i et stigende niveau, jo tættere de arbejder på flymotorerne i drift.

⁷ Fx tjærestoffer (polyaromatiske carbonhydrider) hvor grænseværdien ligger på 200 mikrogram/m³

⁸ Et mikrogram er en milliontedel af et gram