



OPGØRELSE AF EMISSIONER OG ANTAL PARTIKLER PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP

Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 21

2014



AARHUS
UNIVERSITET

DCE - NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

OPGØRELSE AF EMISSIONER OG ANTAL PARTIKLER PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 21

2014

Morten Winther¹
Thomas Ellermann¹
Andreas Massling¹
Per Løfstrøm¹
Jacob Nøjgaard Kløen¹
Matthias Ketzel¹
Uffe Kousgaard²

¹Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab

²Routeware



AARHUS
UNIVERSITET

DCE – NATIONALT CENTER FOR MILJØ OG ENERGI

Datablad

- Serietitel og nummer: Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 21
- Titel: Opgørelse af emissioner og antal partikler på forpladsen i Københavns Lufthavn
- Forfattere: Morten Winther¹, Thomas Ellermann¹, Andreas Massling¹, Per Løfstrøm¹, Jacob Klennø Nøjgaard¹, Matthias Ketzel¹ & Uffe Kousgaard²
- Institution: ¹Institut for Miljøvidenskab & ²Routeware
- Udgiver: Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi ©
URL: <http://dmu.au.dk>
- Udgivelsesår: Januar 2014
- Faglig kommentering: Per Løfstrøm
- Finansiel støtte: Københavns Lufthavne A/S
- Bedes citeret: Winther, M., Ellermann, T., Massling, A., Løfstrøm, P., Nøjgaard, J. K., Ketzel, M. & Kousgaard, U. 2014. Opgørelse af emissioner og antal partikler på forpladsen i Københavns Lufthavn. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet. 84 s. - Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 21. <http://www2.dmu.dk/Pub/TR21.pdf>
Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
- Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
- Sammenfatning: DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet har i foråret 2013 lavet en opgørelse for antallet af partikler udledt i Københavns Lufthavn. Opgørelsen er udarbejdet i relation til arbejdsmiljø og bygger oven på de tidligere undersøgelser, som DCE gennemførte i perioden 2009-2011 med det formål at undersøge niveauet af luftforurening på forpladsen i Københavns Lufthavn. Opgørelsen beregnes ved at kombinere den eksisterende opgørelse over brændstofforbrug fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpemotorer (APU), handlingsgrej og vejgående køretøjer, med faktorer for antal partikler per kg brændstof hentet fra den videnskabelige litteratur. Opgørelsen er opdelt i 5 m x 5 m gitterceller og hver celle indeholder aktivitetsopdelte partikelantal med angivelse af tidspunkt for de enkelte udslip. I modsætning til partikelmasse er handlingsgrej en lille kilde til antal partikler udledt på forpladsen, pga. de generelt meget lave emissionsfaktorer (antal partikler per kg brændstof) for dieselmotorer set i forhold til flymotorer. Emissionsandelen for handlingsgrej beregnes til 2,5 %. Den største emissionsandel beregnes for APU (54 %), efterfulgt af hovedmotorer (43 %). I hele lufthavnen er hovedmotorer langt den største kilde. Der er en vis usikkerhed i de beregnede partikelantal for hovedmotorer og APU pga. en stor variation i de rapporterede emissionsfaktorer for hovedmotorer, og for APU i særlig grad pga. det lave antal tilgængelige målinger. Derfor kan den relative betydning af de to hovedkilder hovedmotor og APU godt ændre sig, når ny emissionsviden foreligger, mens der ikke forventes større ændringer i konklusionen om, at handlingskøretøjerne kun spiller en meget lille rolle i forbindelse med det udledte antal partikler i lufthavnen.
- Emneord: Kastrup Lufthavn, emissioner, hovedmotorer, APU, handlingsgrej, brændstofforbrug, partikelantal, partikelmasse, NOx, CO, HC
- Layout: Majbritt Ulrich
- Foto forside: Tom Jensen
- ISBN: 978-87-7156-015-2
ISSN (elektronisk): 2244-999X
- Sideantal: 84
- Internetversion: Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som <http://www.dmu.dk/Pub/TR21.pdf>

Indhold

Sammenfatning	5
Aktivitetsdata	6
Digitalisering af aktivitetsdata	8
Emissionsfaktorer	9
Beregningsmetode	10
Resultater	10
Summary	18
Activity data	19
Digitalization of activity data	21
Emission factors	22
Calculation method	23
Results	24
Forord	32
1 Indledning	33
2 Emissionsopgørelse	34
2.1 Aktivitetsdata	35
2.2 Digitalisering af aktivitetsdata	39
2.3 Emissionsfaktorer	42
2.4 Kørende trafik	51
2.5 Beregningsmetode	52
3 Resultater	54
3.1 Totale emissioner og brændstofforbrug for hele lufthavnen	54
3.2 Totale emissioner og brændstofforbrug i forpladsområdet	63
3.3 Totale emissioner og brændstofforbrug i et indre forpladsområde	70
3.4 Følsomhedsberegning for hovedmotorers partikelantal	71
4 Konklusion	73
5 Referencer	75
Bilag 1	78

Sammenfatning

Nærværende rapport er udarbejdet for Københavns Lufthavne A/S af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet. Rapporten sammenfatter og dokumenterer resultaterne fra DCE's opgørelse af udledningerne af partikler (angivet ved antal partikler) fra flyenes hovedmotorer, hjælpemotorer (APU, Auxiliary Power Unit), handlingsgrej og vejgående køretøjer i Københavns Lufthavn. Opgørelsen er udarbejdet i relation til arbejdsmiljø, og der har derfor været særlig fokus på opgørelse af udledningerne på forpladsen i lufthavnen. Undersøgelsen er udført for Københavns Lufthavne A/S i løbet af foråret 2013.

Arbejdet bygger oven på de tidligere undersøgelser, som DCE gennemførte i perioden 2009-2011 med det formål at undersøge niveauet af luftforurening på forpladsen i Københavns Lufthavn på basis af emissionsopgørelser, målinger og modelberegninger (<http://www2.dmu.dk/Pub/TR5.pdf>), herunder at kvantificere kilderne til luftforureningen på forpladsen. Resultaterne fra emissionsopgørelserne er vist i nærværende rapport.

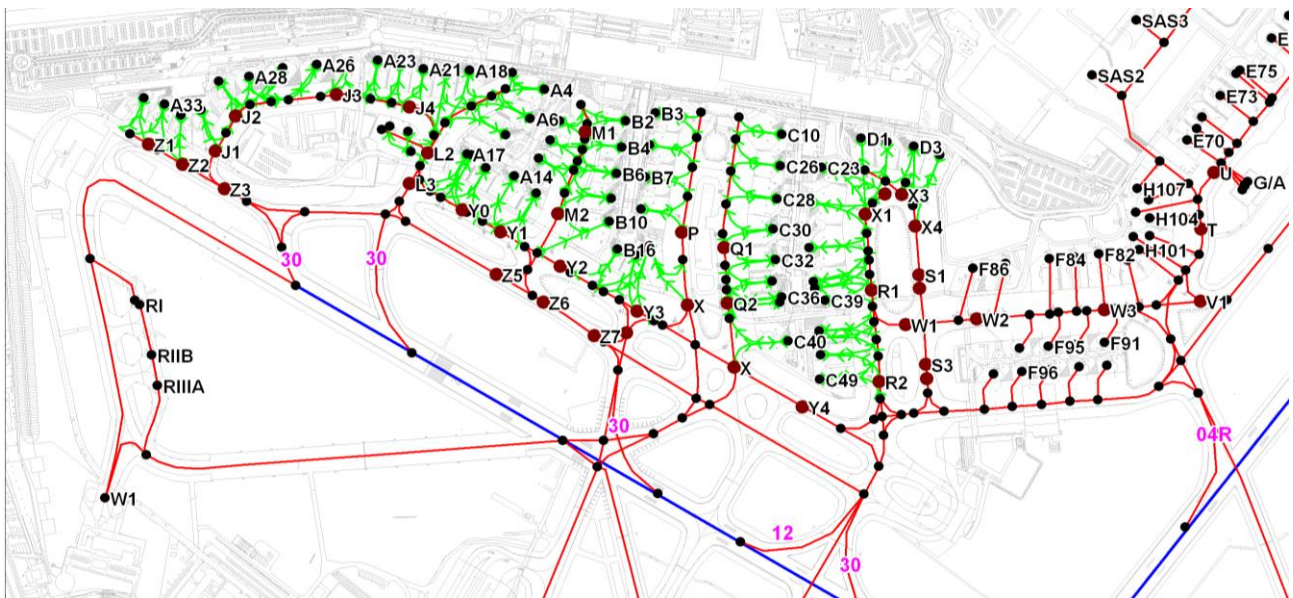
Den første undersøgelse omfattede de luftforureningskomponenter, som udledes fra kilder på forpladsen og som potentielt set kan give anledning til sundhedsskadelige effekter i forbindelse med arbejde på forpladsen. Undersøgelsen inkluderede derfor - udover andre stoffer - målinger af både PM_{2,5} (massen af partikler med diameter under 2,5 µm) og størrelsesfordelingen (partikeldiameter mellem 6 og 700 nm) samt antallet af partikler, der er et mål for forureningen med de ultrafine partikler¹. Undersøgelsen omfattende imidlertid kun en opgørelse af udledningerne af PM_{2,5}, mens der ikke blev lavet en opgørelse over antallet af udledte partikler².

Resultaterne fra målingerne viste et højt antal partikler på forpladsen sammenlignet med tilsvarende tal fra målestationerne i København, herunder ved gademålestationen på H. C. Andersens Boulevard. For at få viden om kilderne til det høje partikelantal på forpladsen har Københavns Lufthavne A/S derfor iværksat nærværende projekt med det mål at få udarbejdet en opgørelse over udledningerne af partikler angivet ved antallet af partikler.

Figur 1 viser et detaljeret kort over forpladsen med afmærkning af standpladser, opstartsmærker for hovedmotorer, rulleveje og et udsnit af start-/landingsbanerne. Kortet er en del af grundlaget for den opgørelse af emissionen fra forskellige kilder, der gøres rede for i det følgende.

¹ Ultrafine partikler (< 100 nm) udgør typisk 75-95% af det samlede partikelantal målt i størrelsesintervallet 6 - 700 nm.

²I den tidligere rapport anvendtes udtrykket "partikelantal" som et kort udtryk for koncentrationen af partikler målt som antal per volumen (partikler per cm³).



Figur 1. Detaljeret kort over forpladsen med angivelse af standpladser (sorte punkter angivet med bogstaverne A-E og et tal), opstartsmærker (brune punkter), rulleveje (røde linjer eller grønne linjer tæt ved standpladserne) og et udsnit af start og landingsbaner (blå linjer).

Aktivitetsdata

Flyoperationer

Til brug for projektet har Københavns Lufthavne A/S fremskaffet flyaktivitetsdata for fire døgn i 2009 med fortrinsvis brug af hver af de fire baneretninger 12, 30, 04L/R og 22L/R. Data består bl.a. af flytype, registreringsnummer, flyoperatør, standplads, off/on block tid, start/landing angivelse, tidspunkt for start/landing og bane.

Brug af hjælpemotorer

Ved opgørelsen af emissionerne er det antaget at tidsrummet for brugen af hjælpemotorer (APU: Auxiliary Power Unit) svarer til de tidsrum, der er anvist i ICAO's (International Civil Aviation Organization) Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889). ICAO's anslåede APU tidsrum er vist i Tabel 1. Den samlede før off-block APU tid opdeles i "APU start up" og "Boarding", der svarer til forskellige motorbelastninger.

Tabel 1. Tidsrum for forskellige driftsfaser for flyenes APU.

	Ankomst	APU opstart	Boarding	Under push-back	Hovedmotorstart
APU belastning	Normal	Opstart	Normal	Normal	Høj
2 motorer	300 s	180 s	216 s	Beregnes	35 s
4 motorer	300 s	180 s	318 s	Beregnes	140 s

For flyafgange er ICAO's anslåede tidsrum for anvendelse af APU samlet set lidt større end de normale 5 minutters APU-drift før off-block tidspunktet, som lufthavnen generelt tillader. I Københavns Lufthavn er det tilladt at bruge APU i længere tid end 5 minutter før off-block tid, når udetemperaturen er hhv. under -10 °C og over 25 °C. I disse tilfælde er de tilladte APU-tidsrum 45 minutter for store fly og 15 minutter for små fly. Det er derfor vurderet, at det er forsvarligt at anvende ICAO's anslåede tidsrum vist i Tabel 1 i forbindelse med emissionsopgørelsen for Københavns Lufthavn.

Efter off-block, når flyet trækkes frem til opstartsmærket regnes med APU i normal drift frem til opstartsmærket. Ved opstartsmærket står flyet stille under motoropstart (i det angivne tidsrum) med høj APU belastning.

Opstart af hovedmotorer

Modelberegningerne antager at flyene trækkes af push-back traktoren med 5 km/t (1,5 m/s) langs de grønne linjer hen til det første opstartsmærke, hvor flyene starter hovedmotorerne (brune punkter i Figur 1).

Brug af handlingskøretøjer

Handlingselskaberne i Københavns Lufthavn har til brug for projektet opstillet et skema (Tabel 2) med de anvendte grejtyper, tidsrum og gennemsnitlig motorbelastning for handlingskøretøjerne, der benyttes ved flyhandling i lufthavnen. Handlingsskemaet er opdelt i overordnede flygrupper med bogstavbetegnelserne B-E, fra de mindste jettfly i B til de største fly i E (A330/A340/B747/B777).

Det er antaget, at toiletbil og vandbil bruges ved handling før start, og at catering samt brændstoftopfyldning foretages efter landing. Der benyttes tankvogn til brændstoftopfyldning af flyene på de standpladser, hvor der ikke er lagt brændstofrør.

Push-back traktorerne bruges til at trække fly med jetmotor fra standpladsen og frem til de specielt afmærkede opstartsmærker i lufthavnen, hvor hovedmotorerne generelt skal startes. Lufthavnen angiver, at flybugseringen frem til opstartsmærket sker med en hastighed på ca. 5 km/t (1,5 m/s). Tidsrummet for brugen af push-back traktoren efter off-block afhænger derfor for hver flyafgang af afstanden mellem standplads og opstartsmærke.

Den samlede liste over grej der benyttes i lufthavnen er udleveret af handlingselskaberne med angivelse af grejtypenummer, brændstoftype, motorstørrelse og årgang/motornorm.

Tabel 2. Liste over anvendte handlingsgrej, længde af handlingsperiode, tiden handlingsgrejet anvendes (grejtid) og belastningsgraden for handlingsgrejet. Baseret på information fra handlingselskaberne i Københavns Lufthavn. Listen er opdelt for landing (øverst) og start (nederst)

Flygruppe →	Ankomst				Start				Lastfaktor
	B	C	D	E	B	C	D	E	
Handlingsperiode (min) →	15	20	30	40	15	20	30	40	
Type handlingsgrej	Arbejdsperiode (min)				Arbejdsperiode (min)				
Bagagetraktor	9	10	15	25	9	10	15	25	0,15
Bagagebånd	10	20	20	20	10	20	20	20	0,15
Push-back ved gate	0	0	0	0	10	10	10	10	0,15
Push-back bevægelse ³	0	0	0	0	Beregn,	Beregn,	Beregn,	Beregn,	0,75
Container loader	0	15	27,5	35	0	15	27,5	35	0,45
Container transportør	0	15	27,5	35	0	15	27,5	35	0,35
Fuel (dispenser truck)	10	15	30	50 ^a	0	0	0	0	0,1
Fuel (refuelling truck)	10	15	30	50 ^a	0	0	0	0	0,1
Cleaning high loader	0	0	10	15	0	0	10	15	0,45
Cargo/Post traktor	0	5	5	5	0	5	5	5	0,15
Toiletbil	0	0	0	0	0	10	20	20	0,25
Catering B/C/D/E	1	3	5	5	0	0	0	0	0,1/0,2/0,22/0,22
Vandbil	0	0	0	0	0	7,5	15	15	0,25

³ Tidsrum afhænger af afstanden mellem standplads og opstartsmærke og beregnes i modellen

Kørende trafik

Københavns Lufthavne A/S har fremsendt trafiktællinger for personbiler, varebiler/minibusser, busser (rute/turist), lastbiler og bagagevogne i 15 minutters intervaller for et helt døgn optalt ud fra overvågningsbilleder i lufthavnen for taxiholdeplads, busterminal v. T2, Drop Off v. T3, Finger B-C og Check Øst. Sammensætningen af alle køretøjskategorier antages at svare til landsgennemsnittet mht. køretøjsalder, drivmiddeltype og motorstørrelse, og det forventes at sammensætningen af bagagevogne er den samme som de vogne der bruges ved flyhandlingen, mht. teknologiniveau, drivmiddel og motorstørrelse. Antagelser om tomgangsperioder og gennemsnitlige kørehastigheder bruges ved de efterfølgende emissionsberegninger

Digitalisering af aktivitetsdata

Flybevægelser

Figur 1 viser et udsnit af det kort, der bruges over hele lufthavnen. Alle standpladser er markeret med nummerbetegnelse. Opstartsmærkerne er markeret som brune punkter, og flyenes rulleveje tæt ved standpladserne er markeret med grønne og røde linjer frem til de fælles rulleveje, der også er markeret med røde linjer. De øvrige sorte punkter er knuder i det digitaliserede vejnet. Fra hver standplads er der tegnet en rute, der fører hen til et fælles start-/slutpunkt for passende grupper af standpladsers videre taxi ad præferencerulleveje til/fra start-/landingsbanerne. Ved digitaliseringen er der brugt et gitternet på 5 m x 5 m som basis for de videre spredningsberegninger.

Digitaliseringen af flybevægelserne inddeles i faserne taxi før start, taxi kø, start, stigning, indflyvning, landing og taxi efter landing (Tabel 3). Dokumentation fra lufthavnen i forbindelse med kortlægning af støjproblemer er brugt til at fastlægge flyenes præferencerulleveje samt start- og landingshastighed. En række antagelser vedr. taxihastighed, startacceleration, landingsdeceleration samt stignings- og landingsvinkler er brugt til at fastlægge tidsforløbet og opholdet i de enkelte beregningsceller, som vertikalt går op til 100 m.

Tabel 3. Faserne anvendt ved digitaliseringen af flybevægelserne

Motor	Operationstype
APU	APU ankomst
APU	APU opstart
APU	APU boarding
APU	APU hovedmotorstart
APU	APU ved push back
Handling	Handling ankomst
Handling	Handling afgang
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)
Hovedmotor	Landing (runway taxi)
Hovedmotor	Take off (runway)
Hovedmotor	Landing (descent)
Hovedmotor	Take off (climb out)
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back
Push back	Push back i fart
Push back	Push back ved standplads

APU, push-back traktor og hovedmotor opstart

Brugen af APU efter ankomst, under APU opstart og ved boarding sker ved standpladsen. Push-back traktoren med APU i drift (og i visse tilfælde med en enkelt hovedmotor tændt) bevæger sig fra den enkelte standplads ad de grønne linjer frem til det tilknyttede opstartsmærke. Flydimensioner bruges til at bestemme APU højden mere præcist.

Brug af handlingskøretøjer

Det er vanskeligt at fastslå præcist, hvornår de enkelte grejtyper benyttes ved handlingen af flyene. Brugen af grejtyperne midles derfor ud over hele handlingsperioden for hhv. ankomst og afgang, bortset fra push-back traktorerne, der anslås at være i brug i ca. 10 minutter før off-block, hvis flyet skal trækkes ud. Handlingsaktiviteterne antages at foregå på højre side af flyet, indenfor et areal svarende til flylængde gange vingelængde.

Emissionsfaktorer

Hovedmotorer

Til brug for de videre brændstof- og emissionsberegninger skal faktorer for brændstofforbrug og emissioner findes for de enkelte fly, der benytter lufthavnen. Ud fra flyets registreringsnummer findes oplysninger om de enkelte flys motorfabrikat (motor ID) og antal motorer i en global database "JP Airline-Fleets 2009/2010" over alle fly (www.flightglobal.com).

Motorernes brændstofforbrug (FF; kg/s), emissionsindekser (EI; g/kg fuel) og sodtal findes i ICAOs Engine Exhaust Emission Database (www.caa.co.uk) for jetmotorer. For turbopropmotorer bruges en emissionsdatabase der vedligeholdes af FOI (Totalförsvarets Forskningsinstitut, www.foi.se) i Sverige. Partikelemissionen er ikke angivet for den enkelte motor, men bliver i stedet beregnet ud fra den ICAO validerede FOA3.0 metode, der tager hensyn til partikelbidragene fra sod og kulbrinter i udstødningen samt flybrændstoffets indhold af svovl.

Faktorer for antal partikler pr. kg flybrændstof (EIn, angivet som #/kg fuel) bestemmes som et gennemsnit af de rapporterede måledata, der er opsamlet ved taxi og take off i flere lufthavne indenfor de seneste år.

APU og opstart af hovedmotorer

Emissionsfaktorer angivet i kg/h for APU kommer fra ICAO's Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889) og fuelfaktorer tages fra den tyske luftkvalitetsberegningsmodel for lufthavne LASPORT (LASat for airPorts, Janicke 2010). APU faktorerne repræsenterer forskellige flystørrelser angivet ved sædekapacitet, og gamle/nye flytyper. HC emissionen ved opstart af hovedmotorer (jetmotorer) beregnes ud fra metoden der benyttes i LASPORT. Faktorer for partikelantal tages fra det nyeste og mest pålidelige målestudie der indtil nu er udført på en APU.

Handlingskøretøjer

For dieselmotorer grupperes emissionsfaktorerne iht. EU's emissionslovgivning for hhv. non road (Stage I-IV) og vejtransport (Euro I-V), og derudover bruges faktorer for ældre motorer. For non road køretøjerne tages emissionsfaktorerne (g/kWh) fra den officielle danske emissionsopgørelse, der rapporteres til UNECE CLRTAP konventionen. For vejtrafikkens dieselmotorer (f.eks. cleaning og catering lastbiler) benyttes EU's emissionsnormer direkte (g/kWh), angivet for den stationære testcyklus ESC (European Stationary Cycle), der gælder for alle motorstørrelser. Det vurderes, at de ældste бага-

getrakterer har en motorteknologi på niveau med benzinbiler fra 1970'erne (ECE 15/00-01), mens de nyeste traktors motorteknologi svarer til de ældste benzinbiler udstyret med trevejskatalysator (Euro 1).

Faktorer for brændstofforbrug og emissioner i g/s findes ved at kombinere brændstofforbrug/emissionsfaktorer i g/kWh for de enkelte handlingskøretøjer (opdelt i teknologitrin og motorstørrelse) med oplysningerne om procentvis motorbelastning og grejtid.

Som kilde til faktorer for partikelantal for handlingskøretøjer benyttes emissionsdata fra en omfattende europæisk vejtrafikemissionsmodel, hvor konsistente partikeldata er opstillet. Emissionsdata for vejtrafikkens køretøjer kan bruges, i det non road motorerne i princippet er de samme som for vejtrafikkens køretøjer, dog med en vis forsinkelse i lovkravene til luftemissioner.

Beregningsmetode

Ud fra emissionsfaktorerne kan emissionsrater (g/s) afledes for hovedmotorer, APU, motoropstart og handlingsgrej. For hver celle i et beregningsgitter med en opløsning på 5 m x 5 m beregnes emissioner og brændstofforbrug som produktet af emissionsraten (g/s) og det beregnede tidsrum (s) for aktiviteten, bestemt ved digitaliseringen af aktiviteterne i lufthavnen:

$$\Delta E(t, i) = ER \cdot \Delta t(t, i)$$

- ΔE = Emission/brændstofforbrug (g) i den i 'te celle på tidspunkt = t
- ER = Emissionsrate/brændstofforbrug (g/s) for hovedmotorer, APU, motoropstart og handlingsgrej
- i = nummer på celle i spredningsmodel
- Δt = Tidsrum i den i 'te celle
- t = Tidspunkt på døgnet målt i fortløbende sekunder

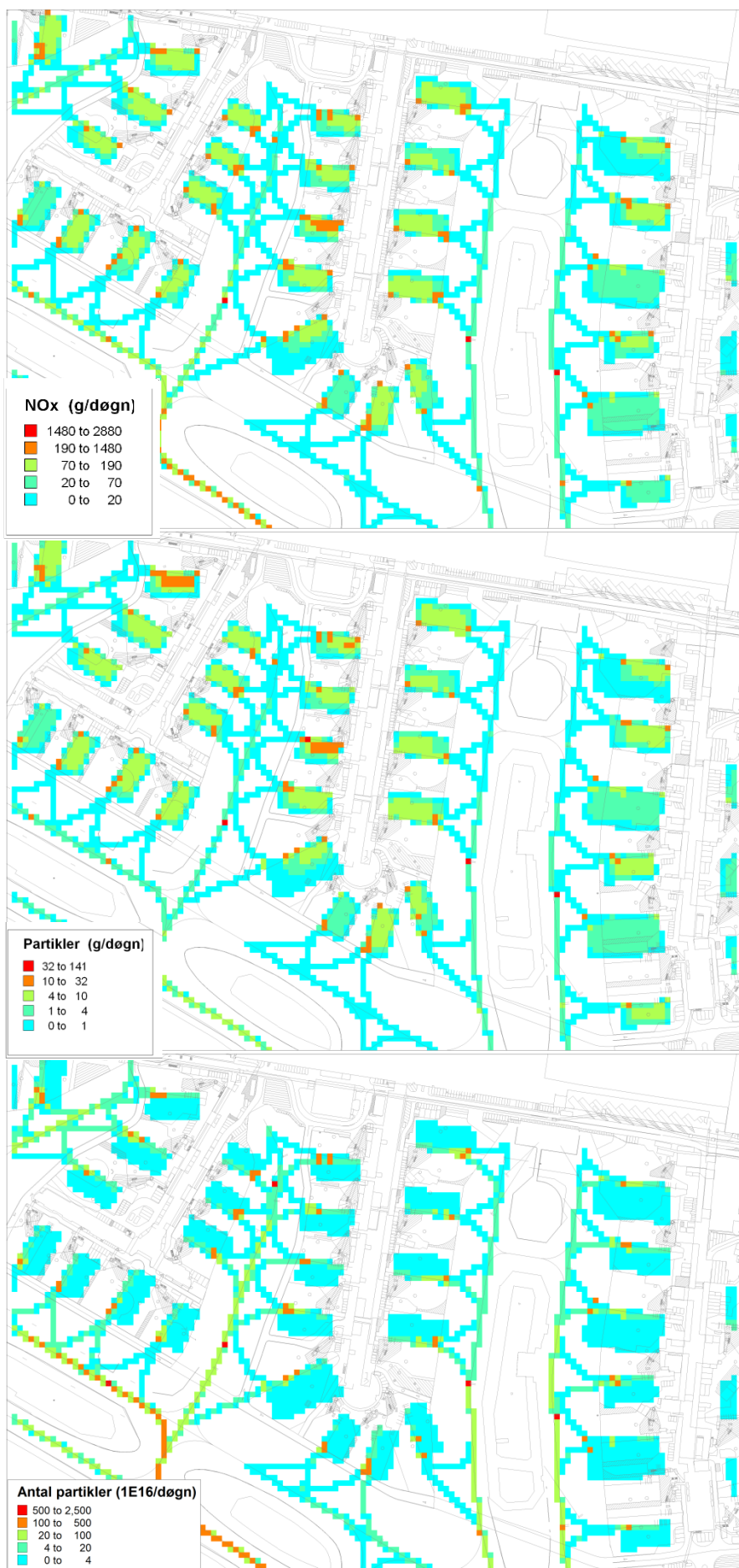
Antallet af partikler findes som produktet af brændstofforbruget, ΔE , og faktoren for antal partikler pr. kg brændstof, EI_n :

$$PN = EI_n \cdot \Delta E(t, i)$$

EI_n = Antal partikler pr. kg brændstof (#/kg brændstof) for hovedmotorer, APU og handlingsgrej.

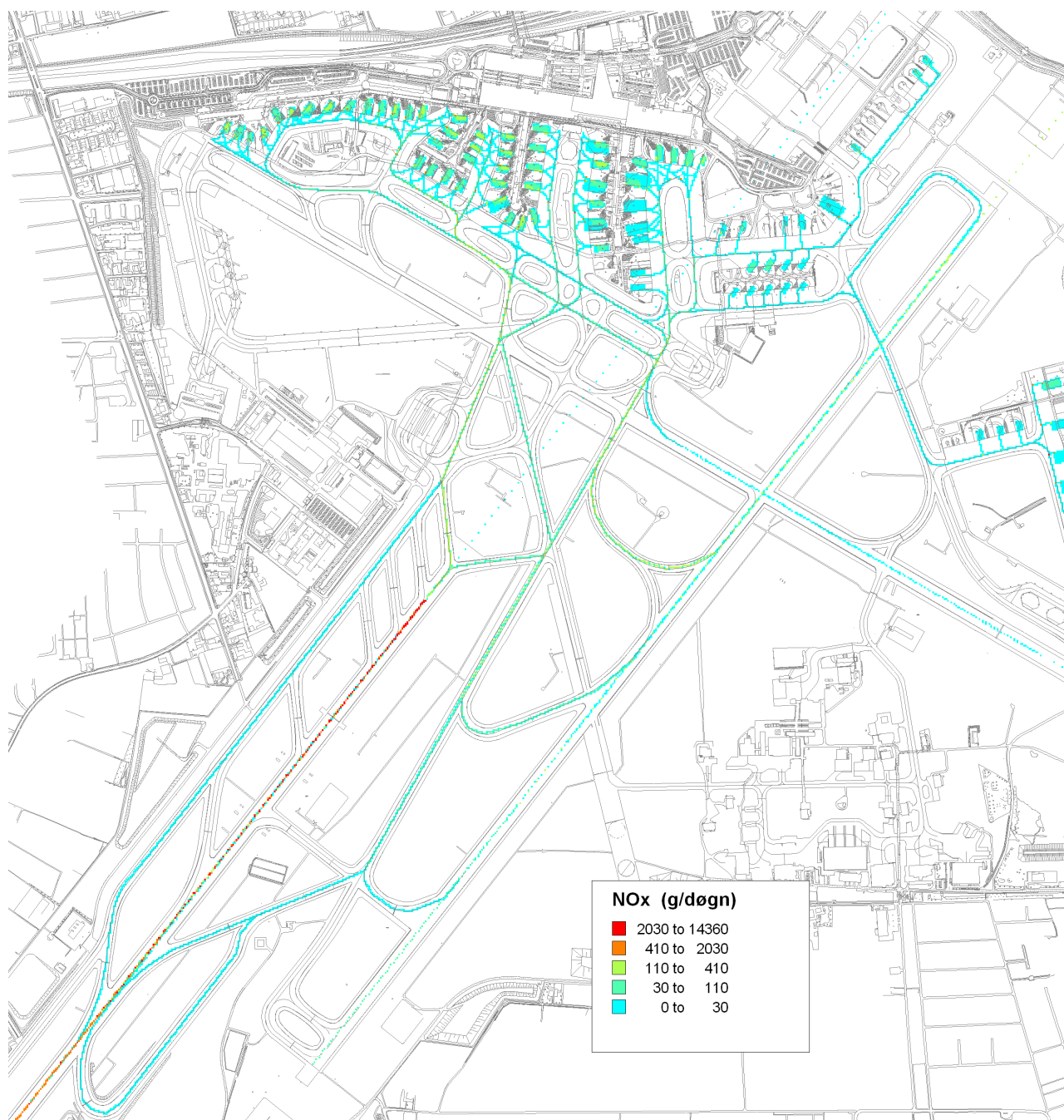
Resultater

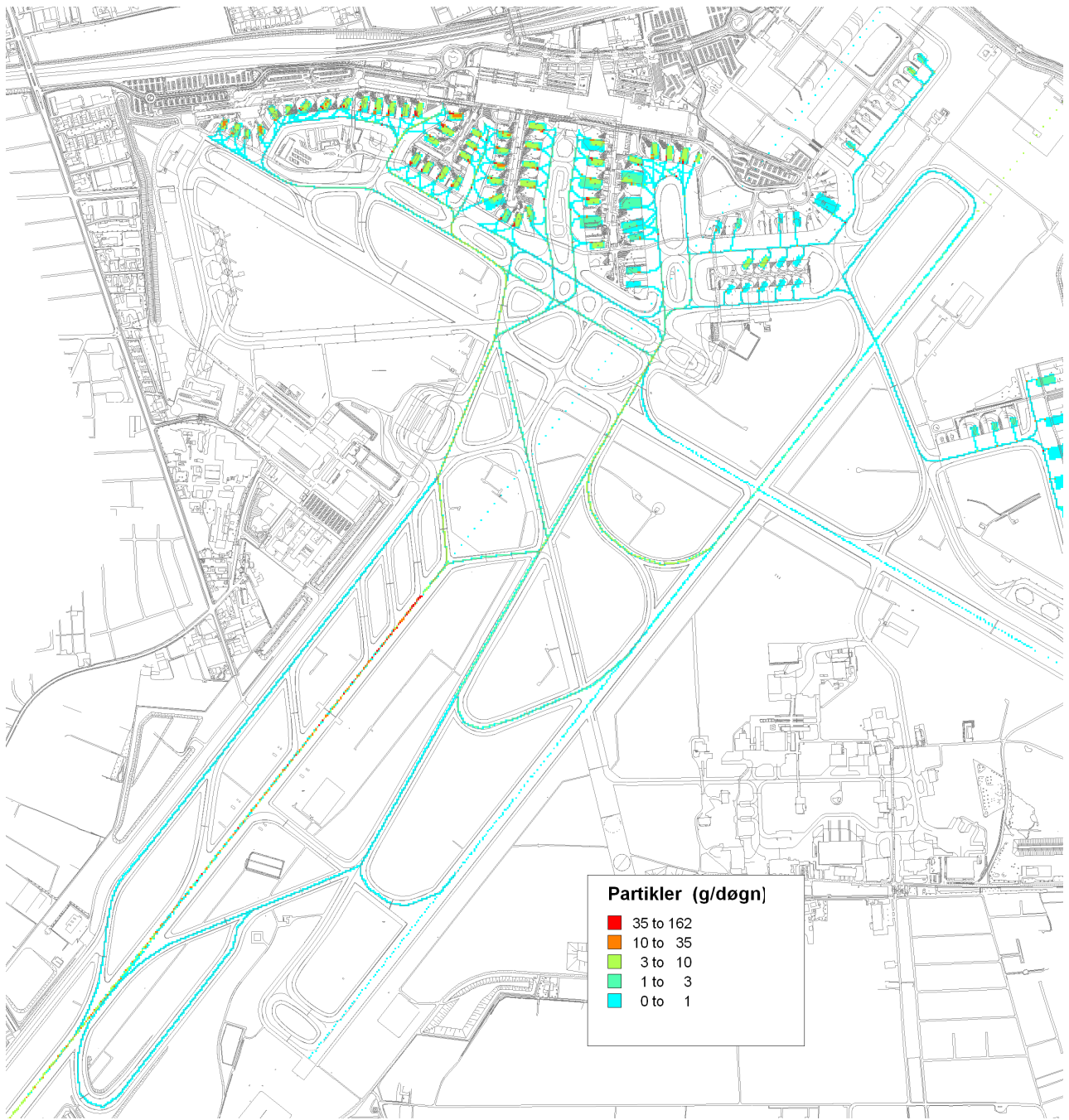
Figur 2 viser de samlede emissioner per døgn (per 5x5 m²) af partikler (vægt og antal) og NO_x for et udsnit af forpladsområdet i lufthavnen. Der ses tydelige emissionsbidrag fra handlingen på højre side af flyet, samt push-back traktoren og APU før off-block (røde mærker hhv. inderst og yderst). Emissionssporet for push-back og APU er også tydelige, når flyene ruller frem til opstartsmærke. Her er APU og hovedmotor bidrag tydelige. Hovedmotorbidrag er også synlige videre ud i lufthavnen, og når flyene ruller ind på standpladsen.

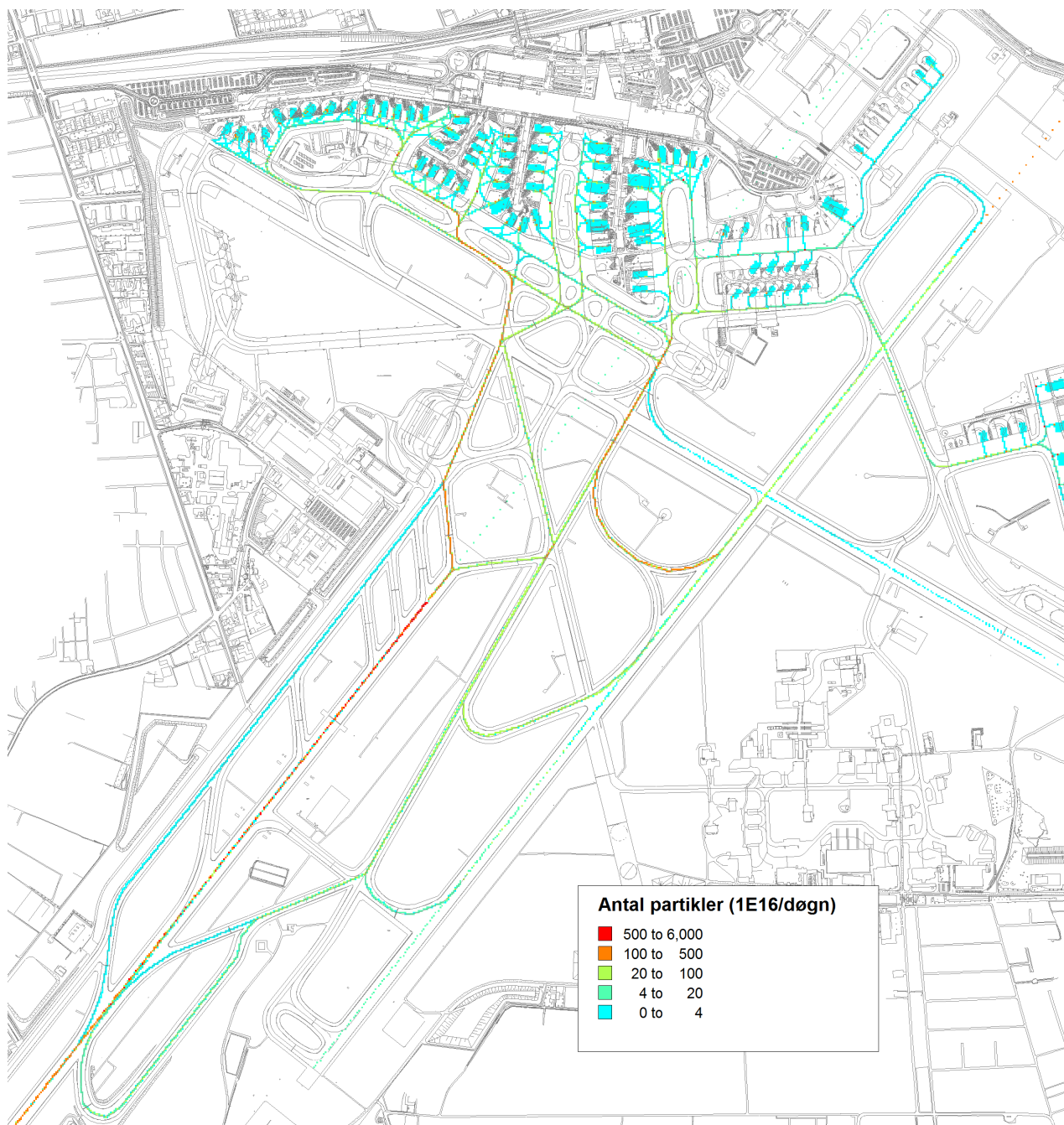


Figur 2. De samlede emissioner af partikler (vægt og antal) per 5x5 m² og NO_x på forpladsen. Gennemsnitligt døgn.

Figur 3 viser de samlede emissioner per døgn (per 5x5 m²) af partikler (vægt og antal) og NO_x for hele lufthavnen for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22.







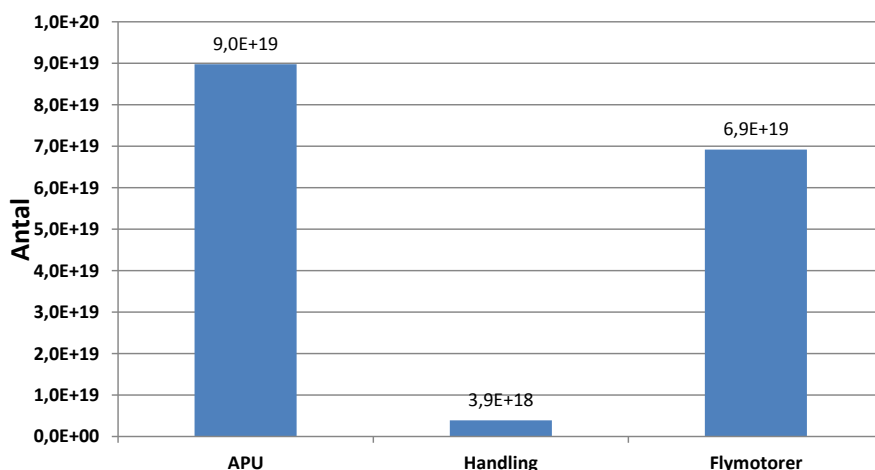
Figur 3. De samlede emissioner af partikler (vægt og antal) per 5x5 m² og NO_x for hele lufthavnen i et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22.

Figur 4 viser de beregnede udledninger af partikel antal fra handling, APU, flymotorer og vejtrafik for hele lufthavnen, og for et mere begrænset område af forpladsen ("indre forplads"; Figur 6) mellem terminalfingrene. Figur 5 viser den procentvise fordeling for alle emissionskomponenterne og brændstofforbruget. De beregnede emissionsniveauer kan generelt forklares ud fra størrelsen af de brændstoffrelaterede emissionsfaktorer og de beregnede energiforbrug. På forpladsen er emissionsandelene fra NO_x og partikler (angivet ved massen) særligt store for handling og APU. For handling er årsagen de meget store brændstoffrelaterede emissionsfaktorer for de dieseldrevne handlingskøretøjer. For APU opvejes de noget mindre brændstoffrelaterede emissionsfaktorer af et væsentligt større samlet energiforbrug. For hovedmotorerne er udledningerne af NO_x og især partikelmasse små på forpladsen pga. de meget små brændstoffrelaterede emissionsfaktorer ved lav motorbelastning. Omvendt udleder hovedmotorerne store mængder kulbrinter (HC) og kulmonoxid (CO) under taxi og ved motoropstart pga. den dårlige motorforbrænding ved disse driftsbetingelser. Andelene for HC og CO bliver særligt store samlet set for hele lufthavnen. Ved take off bliver emissionerne af NO_x fra hovedmotorer særligt store pga. motorens høje forbrændingstemperatur.

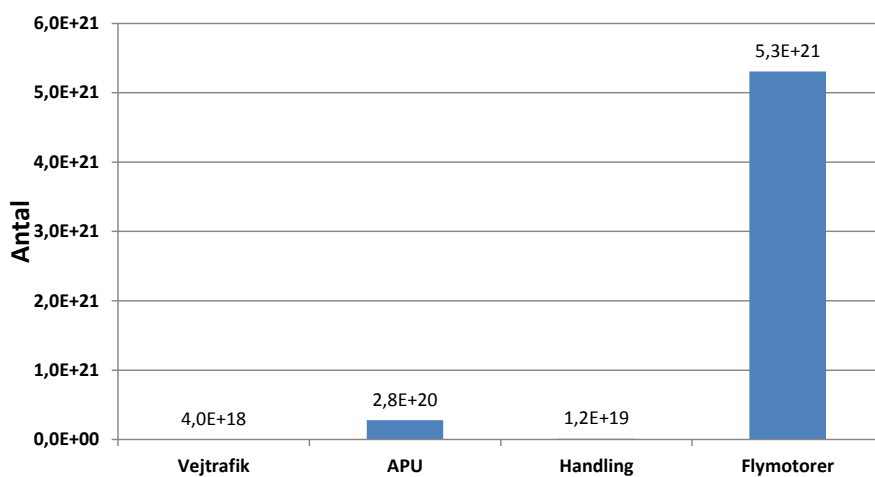
I modsætning til partikler opgjort efter vægt (PM) bliver handlingsgrej en lille kilde til det samlede partikelantal (PN) på "det indre forpladsområde", pga. de generelt meget lave emissionsfaktorer (#/kg fuel) for dieselmotorer set i forhold til flymotorer. Emissionsandelen (PN) for handlingsgrej beregnes til kun 2,5 %. Den største emissionsandel (PN) beregnes for APU på 54 %, og for hovedmotorer beregnes en lidt mindre emissionsandel på 43 %. I hele lufthavnen er hovedmotorer langt den største kilde. APU andelen af det samlede partikelantal svarer til APU andelen af det samlede energiforbrug (ca. 5 %). Bidraget fra vejtrafik er minimalt (Figur 4) og udelades derfor i det efterfølgende.

Der er en vis usikkerhed de beregnede partikelantal for hovedmotorer pga. en stor variation i de rapporterede emissionsfaktorer (#/kg fuel), som følge af metodeusikkerheder og de generelt varierende målebetingelser, og for APU i særlig grad pga. det lave antal tilgængelige målinger. Usikkerheden på de beregnede emissioner er større for partikel antal end for de øvrige komponenter. Det er metodemæssigt vanskeligt at udføre en kvantitativ bestemmelse af det udledte partikel antal ud fra målinger, da der pga. fysiske og kemiske omdannelser sker en hurtig ændring i partikelantallet efterhånden som røgfanen afkøles og spredes. Til sammenligning sker der langt mindre ændringer i partikelmassen i forbindelse med spredningen af røgfanen. Derudover kan forskellene i #/kg fuel fra studie til studie skyldes forskelle i placeringen af måleapparatur i forhold til de passerende fly, røgfaneeudvikling, meteorologiske forhold (vindretning og -hastighed, temperatur, luftfugtighed), svovlindholdet i flybrændstof samt de anvendte måleapparater og deres måleusikkerhed. Pga. de ovennævnte usikkerheder kan den relative betydning af de to hovedkilder, hovedmotor og APU, godt ændre sig, når ny emissionsviden foreligger, mens der ikke forventes større ændringer i konklusionen om, at handlingskøretøjerne kun spiller en meget lille rolle i forbindelse med udledninger af partikelantal.

Antal partikler/døgn - indre forplads

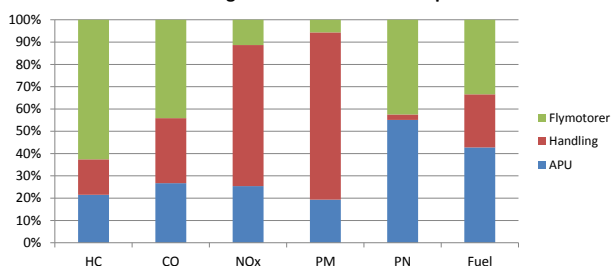


Antal partikler/døgn - hele lufthavnen

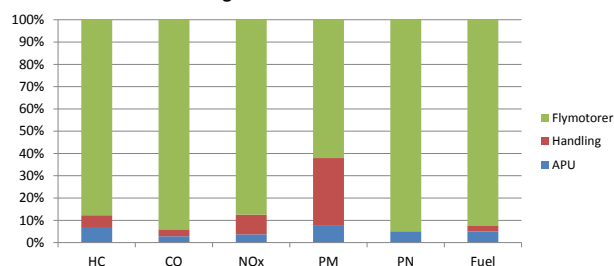


Figur 4. Udledninger af antal partikler per døgn for forpladsen og hele lufthavnen fordelt på vejtrafik, APU, handling og hovedmotor

% fordeling af emissioner - indre forplads



% fordeling af emissioner - hele lufthavnen

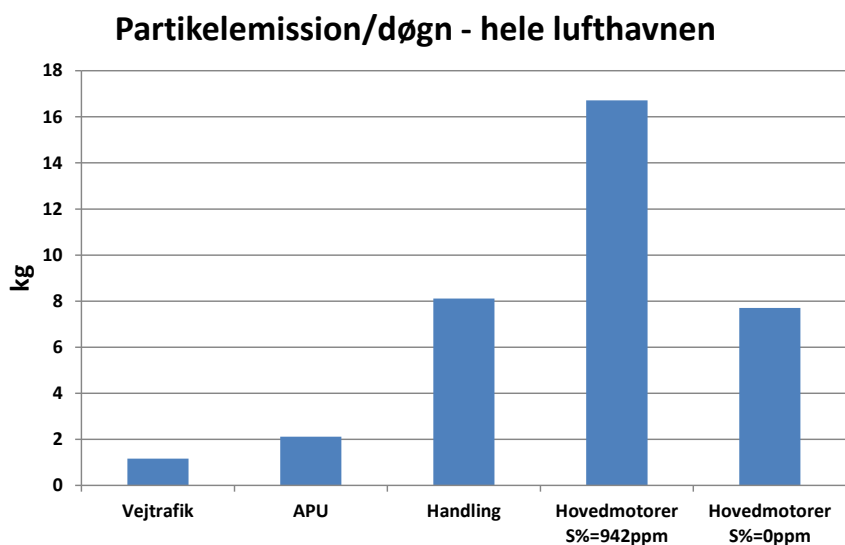


Figur 5. Den procentvise fordeling af emissionerne på den indre forplads (venstre) og hele lufthavnen. HC står for kulbrinter.



Figur 6. Det begrænsede område af forpladsen ("indre forplads") mellem terminalfingrene.

Figur 7 viser partikelemissionen på massebasis i hele lufthavnen for de tre hovedkilder og den kørende trafik. Det gennemsnitlige svovlindhold i flybrændstoffet er 942 ppm, ifølge fueldeklarationer fra lufthavnens brændstoflager, og denne værdi er brugt ved beregning af jetmotorernes partikel-emissionsfaktorer, hvoraf de sulfatbundne partikler udgør en stor andel. Afledt af dette forventes partikelemissionen fra hovedmotorer i hele lufthavnen at falde med over 50 %, hvis al svovl fjernes fra flybrændstoffet. I den forbindelse skal det nævnes, at der sandsynligvis også er potentiale for væsentligt reducerede partikelemissioner for APU, hvis der benyttes flybrændstof med lavt svovlindhold. Endvidere viser Figur 7, at emissionsbidraget fra den kørende trafik er meget lille. Ændringer i svovlindholdet forventes at påvirke udledningerne af partikel antal på omtrent samme måde som partikelmassen.



Figur 7. Partikelemissionen (kg per døgn) for hele lufthavnen fordelt på vejtrafik, APU, handling, hovedmotor med normalt S-indhold i brændstof (ME %S) og hovedmotor med 0% svovl i brændstof (ME 0% S).

Summary

This report is made by DCE - Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University on behalf of Copenhagen Airport, and summarizes and presents the results of an emission inventory compiled for particulate numbers in Copenhagen Airport emitted by aircraft main engines and APU's (Auxiliary Power Unit), handling equipment and road transport vehicles. The inventory is made with emphasis on the apron in relation to the working environment. The emission inventory was developed in the spring 2013 by DCE - Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University for Copenhagen Airports A/S.

The work builds upon the previous assessments conducted by DCE in the period 2009-2011 with the main objectives to quantify the atmospheric pollutants at the apron of Copenhagen Airport based on emission inventories, measurements and model calculations (<http://www2.dmu.dk/Pub/TR5.pdf>), and in order to quantify the sources to air pollution at the apron. The emission inventory results are shown in the present report.

The previous study covered atmospheric pollutants emitted from sources at the apron, which have the potential to cause health effect amongst the staff working at the apron. Hence the assessment included among other substances measurements of PM_{2.5} (mass of particles with diameter smaller than 2.5 µm), the particle size distribution (diameter range 6-700 nm) and the total number of particles being an indicator for the ultra fine particle air pollution⁴. The study, however, only comprised an inventory of PM_{2.5}, no particle number based inventory was established⁵.

The measurement results showed high particle number concentrations at the apron compared with measured concentrations at the measurement stations in Copenhagen including the street measurement station at H.C. Andersens Boulevard. In order to gain more knowledge of the sources of the high particulate numbers at the airport apron, Copenhagen Airport has initiated the present emission inventory project with the aims to estimate the number of particles emitted.

Figure 1 is a detailed map of the airport apron showing terminal gates, main engine start-up marks, aircraft taxiways and runways. The map is a part of the basis for the emission inventory for different sources in the airport explained in the following.

⁴ Ultra fine particles (< 100 nm) amount to 75-95% of the total number of measured particles in the 6 - 700 nm size range
⁵In the previous study the expression "particle numbers" referred to the particle concentration given as number per volume (particles per cm³)

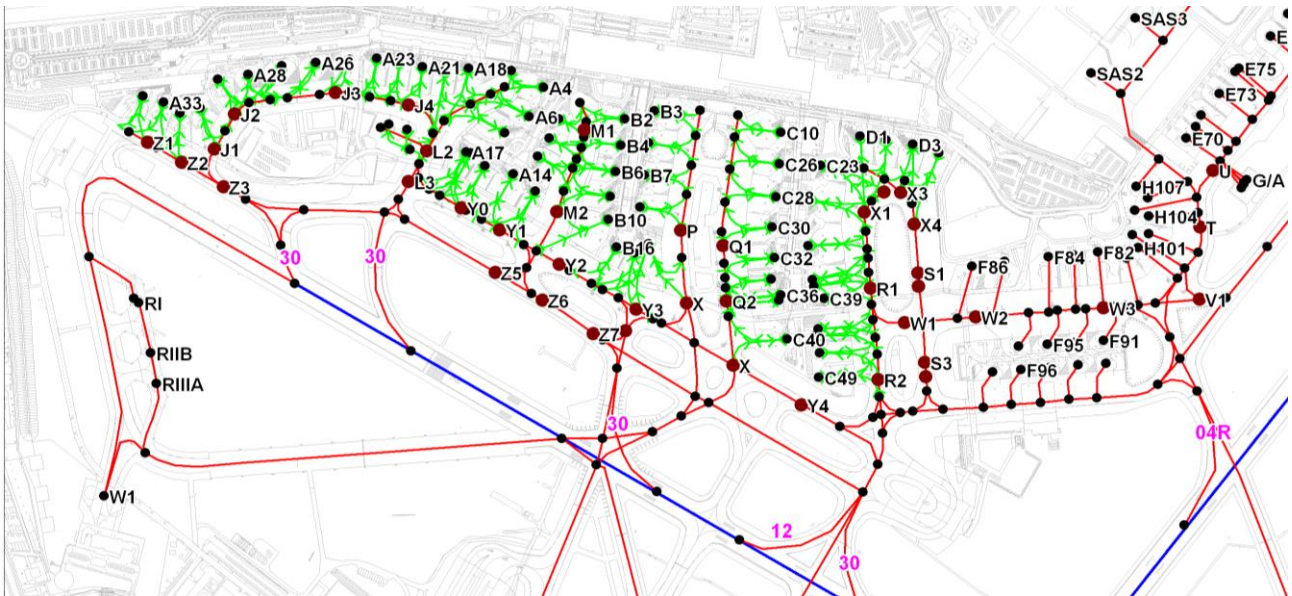


Figure 1. Detailed map of the airport apron showing terminal gates (black dots marked with letters A through F and a number), main engine start-up marks (brown dots), aircraft taxiways (red lines or green lines marked near the gates) and parts of the runways (blue lines).

Activity data

Flight operations

As activity data for the project, the airport has provided flight operational data for four days in 2009 with preferable use of each of the runways 12, 30, 04L+04R and 22L+22R. The data consist of aircraft type, registration number, airline operator, gate, off/on block time, specification of start/landing runway and time.

Auxiliary power units

The International Civil Aviation Organization (ICAO) provides specific time periods (Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889)) for the use of the Auxiliary Power Units (APU). These time durations are shown in Table 1. The total APU time prior to off-block is specified for *APU start up* and *Boarding* corresponding to different engine loads.

Table 1. APU activity schedule. The APU time during push-back is calculated.

APU load	Arrival Normal	APU start-up Start-up	Boarding Normal	Push-back Normal	Main engine start-up High
2 engines	300 s	180 s	216 s	to be calculated	35 s
4 engines	300 s	180 s	318 s	to be calculated	140 s

Copenhagen Airports generally accepts the APU's to run for 5 minutes following on-block and prior to off-block, which is somewhat shorter than ICAO's recommendations for departures given in Table 1.

However, APU usage in the airport prior to off-block can exceed 5 minutes if the temperature is lower than -10 °C or above 25 °C. Under these conditions the APU is allowed to run for 45 min on large aircrafts and 15 min on small aircrafts. For these reasons it was concluded to apply ICAO's recommendations for APU when calculating emission inventories at Copenhagen Airport.

Following off-block, when the aircraft is pulled towards the start-up mark, the APU is assumed to be in normal operation. At stand still at the start-up mark, the aircraft starts up the main engines and the APU load is high (Table 1).

Main engine start-up

In the model, the aircraft is assumed to be pulled by the push-back tractor with a speed of 5 km/h (1.5 m/s) along the green lines toward the nearest point of main engine start-up (brown dots in Figure 1).

Usage of handling equipment

The handling companies have provided information of handling equipment types in use at the gate after aircraft arrival and prior to aircraft departure along with the total handling time per arrival/departure, the working time per equipment type and average engine load factors (Table 2). The handling information are grouped into the four aircraft size categories B-E, comprising the whole range of aircraft types present in the flight operational data from the smallest jets in B to the largest jets in E (A330/A340/B747/B777).

According to the handling companies the toilet truck and water truck are used in connection with aircraft departure, whereas catering and refueling of the aircraft are made after arrival. The fuel truck is used for refueling of aircraft at the gates not equipped with fuel pipe lines.

The push-back tractors are used to pull jet aircraft from the gate towards the point of main engine start-up. The push-back tractors pull with a speed of 5 km/h (1.5 m/s), and hence, for each departure, the time duration for tractor-ing after off-block depends of the distance between the gate and the point of main engine start-up.

For the subsequent emission calculations, a complete list of the handling equipment is available from the handling companies comprising equipment ID number, fuel type, engine size, and engine age/or EU emission stage.

Table 2. List of handling equipment, duration of handling period and working time, and engine load factor for handling machinery used in Copenhagen Airport. Based on information from the airport handling companies.

Aircraft category →	Arrival				Departure				Load factor
	B	C	D	E	B	C	D	E	
Handling period (min) →	15	20	30	40	15	20	30	40	
Handling equipment type	Working time (min)				Working time (min)				Load factor
Baggage truck	9	10	15	25	9	10	15	25	0.15
Conveyor belt	10	20	20	20	10	20	20	20	0.15
Push-back at gate	0	0	0	0	10	10	10	10	0.15
Push-back moving ⁶	0	0	0	0	Calc.	Calc.	Calc.	Calc.	0.75
Container loader	0	15	27.5	35	0	15	27.5	35	0.45
Container transporter	0	15	27.5	35	0	15	27.5	35	0.35
Fuel (dispenser truck)	10	15	30	50 ^a	0	0	0	0	0.1
Fuel (refuelling truck)	10	15	30	50 ^a	0	0	0	0	0.1
Cleaning high loader	0	0	10	15	0	0	10	15	0.45
Cargo/Post tractor	0	5	5	5	0	5	5	5	0.15
Toilet truck	0	0	0	0	0	10	20	20	0.25
Catering B/C/D/E	1	3	5	5	0	0	0	0	0.1/0.2/0.22/0.22
Water truck	0	0	0	0	0	7.5	15	15	0.25

Ground-based vehicles

Copenhagen Airports A/S has provided traffic counts of passenger cars, vans and minibuses, urban buses and coaches, trucks and baggage trucks divided into 15 minutes intervals during 24 hours. Countings were based on airport cameras located at the taxi rank, the bus stops at T2, the drop-off zone at T3, Finger B-C and Check East. The composition of the vehicle fleet is assumed to equal the national average with respect to age, fuel type and engine displacement. Furthermore, it is assumed that the composition of baggage truck fleet equals that of the vehicles used during handling with respect to engine technology level, fuel type and engine displacement and type of fuel. Assumptions about the duration of idle and average driving speeds are used in the following calculations of emissions.

Digitalization of activity data

Aircraft movements

A section of the airport is shown Figure 1. All gates are marked with a number. Start-up marks are shown as brown dots, and the taxiways close to the gates are visible as green lines. Shared taxiways are visible as red lines. The remaining small (black) dots in Figure 1 are points in the digitalized road network. The movement of the aircrafts and the activities of the APU, pushback trucks, main-engine start-up and handling are digitized in a 5 m x 5 m grid on the electronic map of the airport.

The digitalization of the aircraft movements is split into taxi prior to start, taxi waiting in line, start, takeoff, descend, landing, and taxi after landing (Table 3). Runway aircraft velocity, priority taxiways are derived from a previous survey on noise at the airport. A number of assumptions on taxi speed, aircraft runway acceleration/deceleration and climb/landing gradients were made in order to define time periods and duration of individual operations in the grid cells with a vertical limit of 100 m.

⁶ The time depends on the distance from the gate to the point for main engine start-up and is calculated in the model

Table 3. Individual operational types used for the digitalization of aircraft operations

Engine	Type of operation
APU	APU arrival
APU	APU start-up
APU	APU boarding
APU	APU start-up of main engine
APU	APU at push-back
Handling	Handling arrival
Handling	Handling departure
Main engines	Taxi arrival (taxi way)
Main engines	Taxi departure (taxi way)
Main engines	Taxi departure (queing)
Main engines	Landing (runway deceleration)
Main engines	Landing (runway taxi)
Main engines	Take off (runway)
Main engines	Landing (descent)
Main engines	Take off (climb out)
Main engines	Main engine at engine start
Main engines	Main engine at push-back
Push back	Push-back moving
Push back	Push-back at gate

APU, push-back tractor and main engine start-up

The APU activities after aircraft arrival, during APU start-up and aircraft boarding occur at the gate. In the model, the APU engine is running during the push-back of the aircraft (in some situations one main engine is turned on) along the green lines toward the point of main engine start-up. Aircraft dimension data determine the vertical placement of the APU in each case.

Use of handling vehicles

It is difficult to determine exactly *when* the different types of operation are in use during handling. The duration of the different types of operation are therefore averaged over the entire handling period for arrival and departure. An exception is the pushback trucks, which are assumed to be in use during approximately 10 minutes prior to off-block in case the aircraft is pulled out. The handling activities are assumed to take place at the right side of the aircraft within an area corresponding to the length of one wing multiplied by the length of the aircraft.

Emission factors

Main engines

As input for the subsequent fuel consumption and emission calculations, fuel flow and emission factors must be determined for each aircraft using the airport. By using the aircraft registration number as an entry the specific engine type and number of engines are found in the global aircraft database "JP Airline-Fleets 2009/2010" (www.flightglobal.com). The engine fuel flows (kg/s), emission indexes (g/kg fuel; CO, HC, NO_x) and soot numbers are looked up in the ICAOs Engine Exhaust Emission Database (www.caa.co.uk) for jet engines. For turbo prop aircraft fuel flows and emission indexes of CO, HC and NO_x are used from the emission database kept

by the Swedish FOI (Totalförsvarets Forskningsinstitut, www.foi.se). Emission indexes for PM on a mass basis are not available from the ICAO or FOI databases. Instead these emission indexes are calculated by using the ICAO validated FOA3.0 method for jet engines as a function of the engine specific soot number and HC emission and the sulphur content in the jet fuel. Factors for particle numbers per kg jet fuel (EI_n , #/kg fuel) for idle and take off power settings are found as an average of the measured values for different airports reported during the recent years.

APU and main engine start-up

Emission factors for APU (kg/h) are taken from ICAO's Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889) and fuel factors come from the German LASPORT (LASat for airPorts) air quality calculation model for airports. The APU emission data are grouped into aircraft seating capacities and old/new aircraft types. The HC emissions for main engine start-ups are calculated from the method given in LASPORT. Factors for particle numbers are taken from the newest and most reliable measurements made on an APU engine until now.

Handling equipment

For diesel engines the emission factors of CO, HC, NO_x and PM are grouped according to the EU emission directives for non road engines (Stage I-IV) and road transport vehicles (Euro I-V), and supplementary information are used for older engines. The fuel consumption and emission factors (g/kWh) for non road engines are taken from the mobile part of the official Danish emission inventories reported for the UNECE CLRTAP convention. In the case of road transport vehicles (e.g. cleaning and catering trucks) the EU ESC (European Stationary Cycle) emission limits (g/kWh) are directly used. For old and new gasoline fuelled baggage tractors, respectively, the engine technologies are similar to the engine technologies for gasoline cars in the 1970's (ECE 15/00-01) and the first generation of catalyst cars (EURO 1).

Time related fuel and emission factors are derived by combining the g/kWh specific fuel consumption/emission factor with the detailed handling equipment data for technology level and engine size, and the average information of engine load factor and equipment working time.

The detailed European road transport emission model COPERT IV contains consistent data for particulate numbers which can be used as a source for handling equipment. With a delay in implementation dates for emission legislation limits, the engines used by non road machinery are in principle the same as the ones used by road transportation vehicles

Calculation method

Emission rates (g/s) for the main engines, APU, engine start-up and handling equipment are derived from the emission factors. Emissions and fuel consumption are calculated for each 5 m x 5 m meter grid cell as the product of emission rate (g/s) and the calculated time interval (s) from the digitalization of the activities in the airport:

$$\Delta E(t, i) = ER \cdot \Delta t(t, i)$$

- ΔE = Emission/fuel consumption (g) in the i 'th grid cell at time t
- ER = Emission rate/fuel consumption (g/s) for the main engine, APU, engine start-up and handling equipment
- i = Grid cell number in the dispersion model
- Δt = Time interval in the i 'th grid cell
- t = Time of the day measured in seconds ($0 < t < 86,400$)

The particulate numbers are found as the product of the fuel consumption, ΔE , and the #/kg fuel factor, EI_n :

$$PN = EI_n \cdot \Delta E(t, i)$$

PN = Number of particles

EI_n = Number of particles per kg fuel (#/kg fuel) for main engines, APU and handling equipment.

Results

In Figure 2 the diurnal emissions (per $5 \times 5 \text{ m}^2$) of particles (mass and numbers) and NO_x are shown for a section of the airport apron area. Significant emission contributions are visible on the right side of the aircraft, from the handling activities as well as from the pushback truck and APU activities prior to off-block. These are visible as red marks on the inner and outer side. The emission trails from the pushback truck and APU are also clear during taxiing from the gates to the start-up marks. By the start-up mark the emissions from APU and main engine are visible too. Furthermore, the contribution from the main engines is clearly visible during taxiing towards the runways, and when the aircraft arrive at the gates.

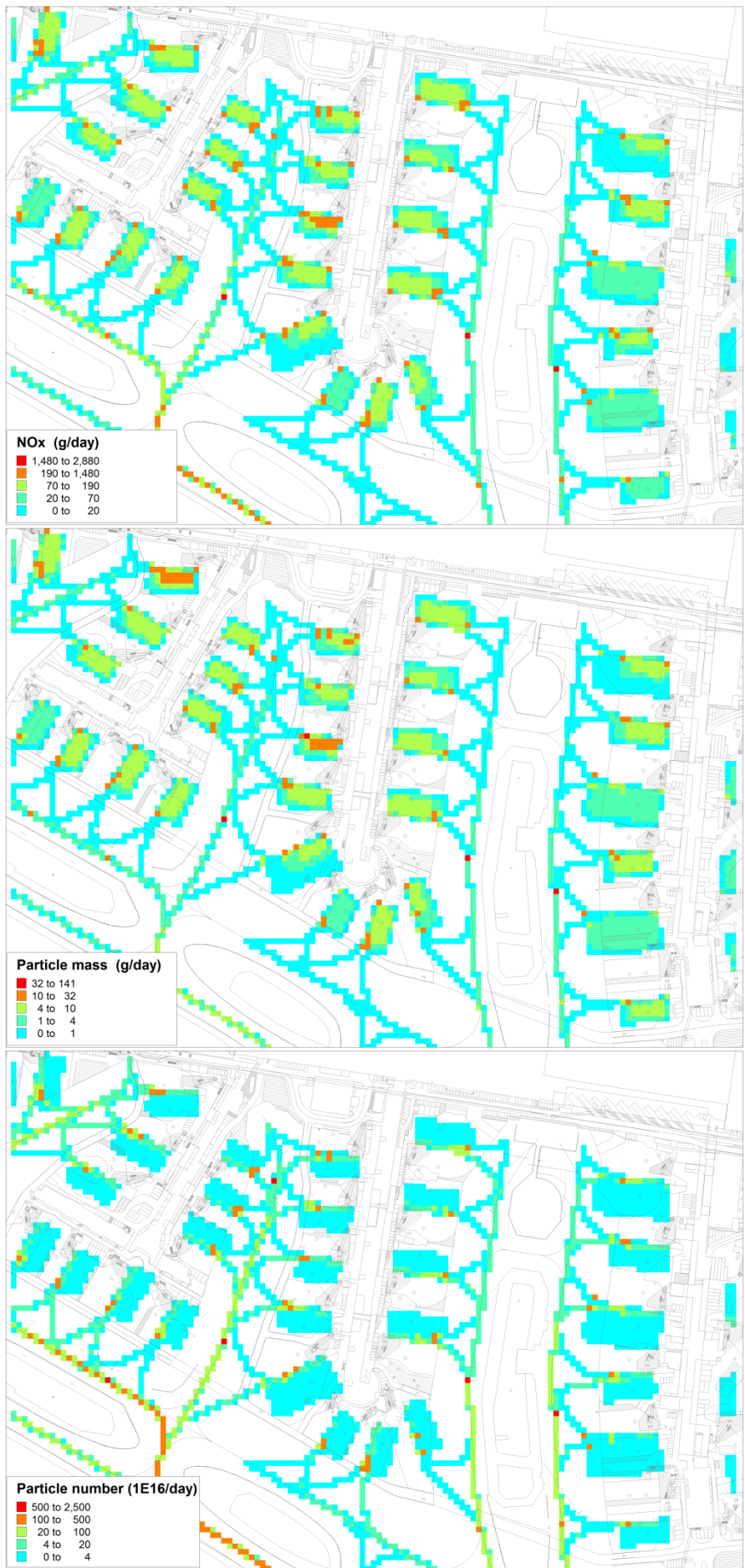
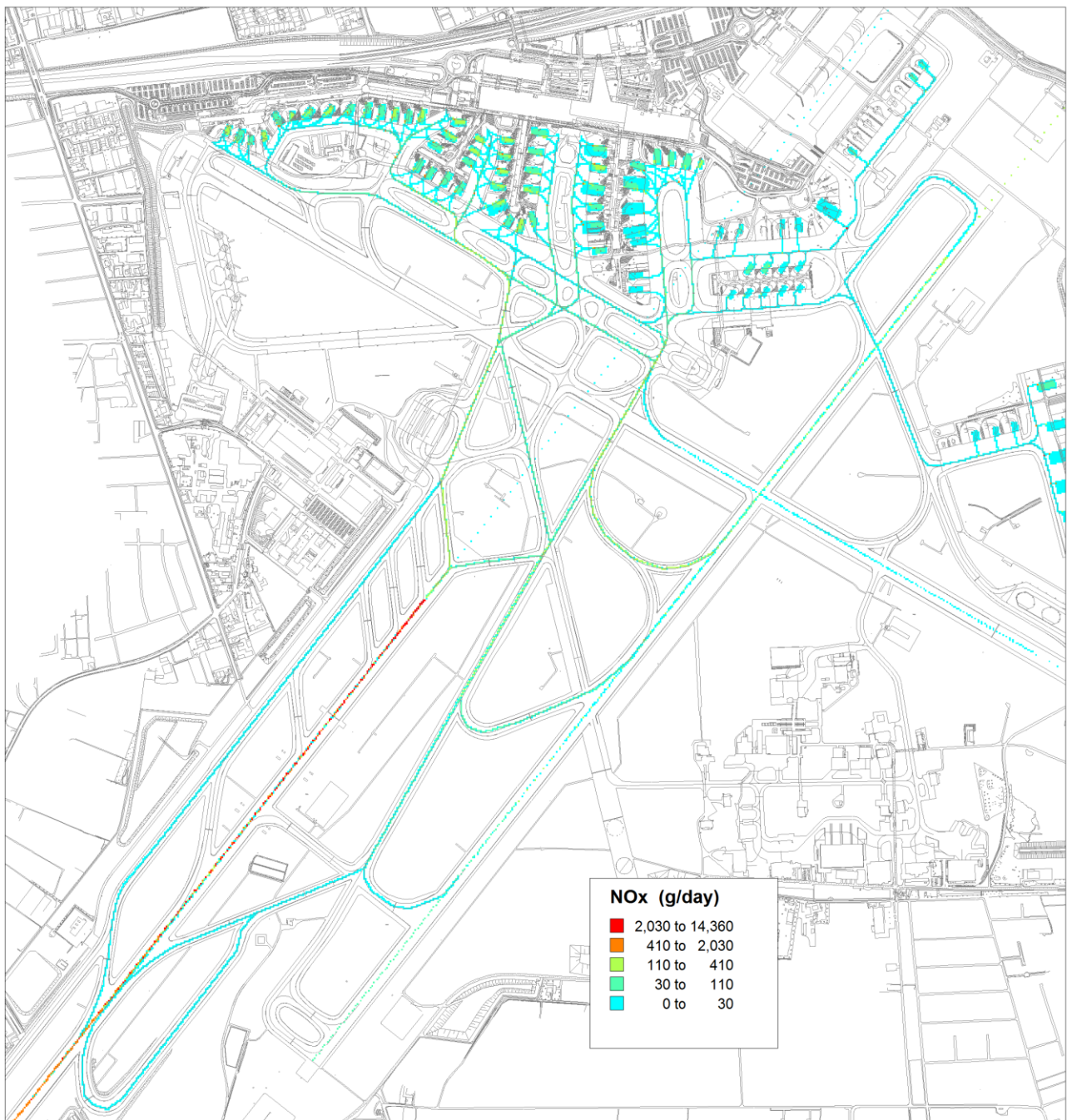
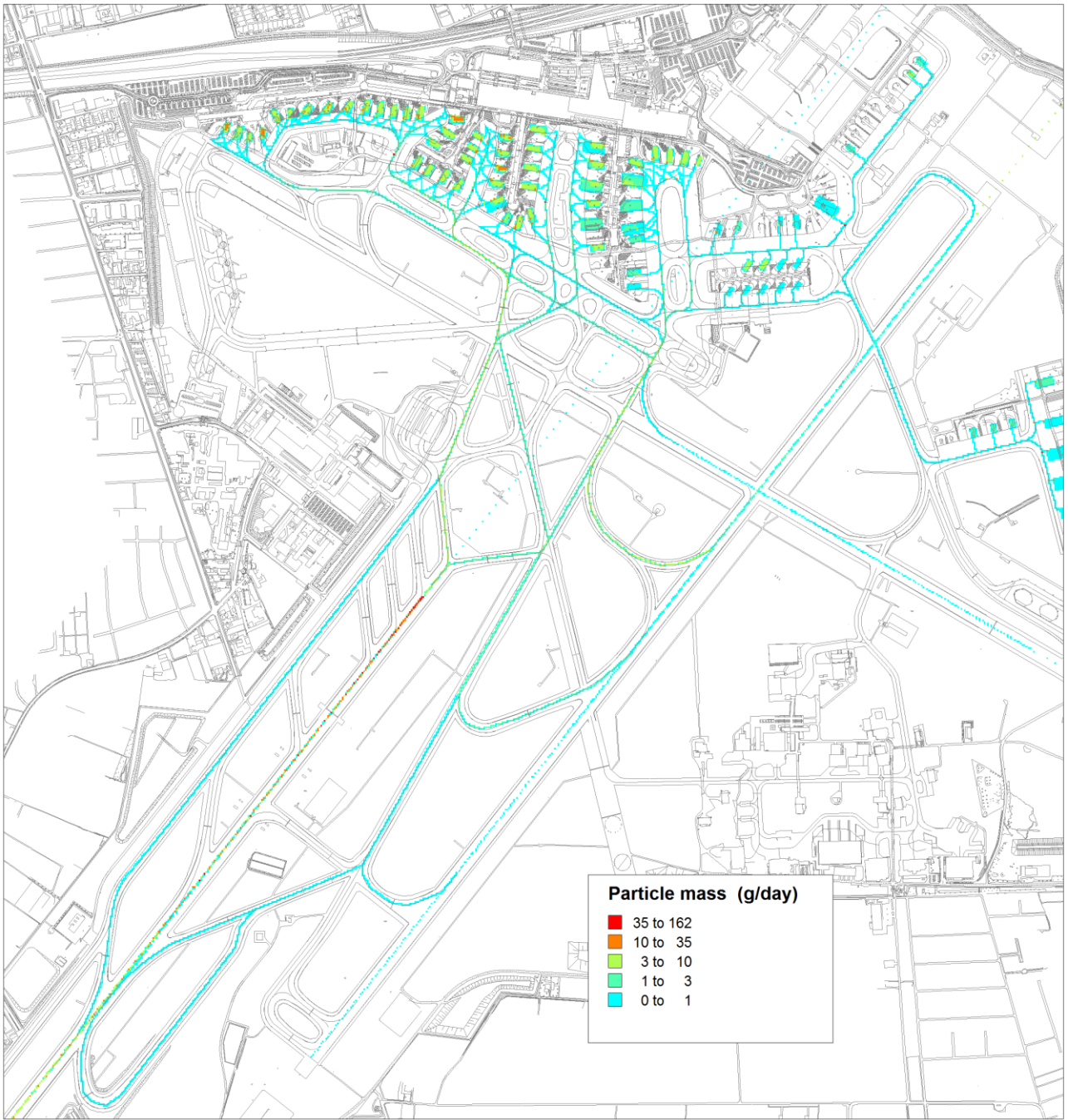


Figure 2. The total emissions of particles (mass and numbers) per 5x5 m² and NO_x for a section of the airport apron area. Average day.

Figure 3 shows the total emissions of particles (mass and numbers) and NO_x (per 5x5 m²) for the whole airport for one day with preferable use of lane 22.





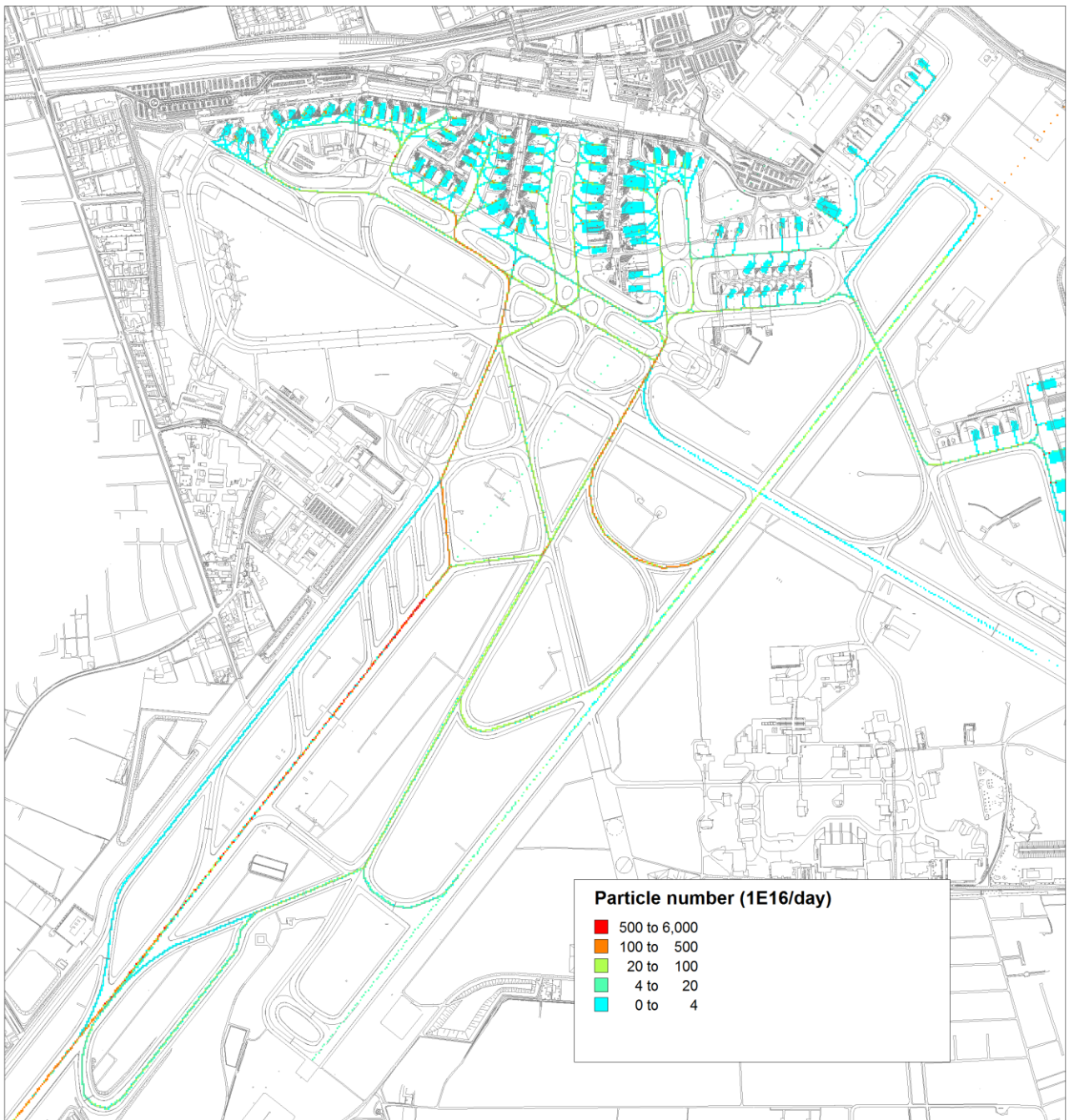


Figure 3. Total emissions of particles (mass and numbers) and NO_x (per $5 \times 5 \text{ m}^2$) for the whole airport for one day with preferable use of lane 22.

Figure 4 shows the emissions of particles (mass and numbers) from handling, APU, main engines and road transport for the entire airport in addition to a limited section of the apron ("Inner apron"; Figure 6) situated between the terminal fingers. Figure 5 shows the relative emission contributions for all emission components and the fuel consumption. At the apron, handling and APU contributes significantly to the emission of NO_x and particles by mass. For handling, the high emissions are due to the high fuel related emission factors for the diesel fueled handling equipment (Table 3). Having somewhat lower emission factors, the large fuel consumption for APU is the main reason for the high emissions in the APU case.

For main engines the NO_x and PM emissions are small on the inner apron due to the very small emission factors during taxiing. Conversely, the main engines emit large amounts of HC and CO while taxiing and during engine start-up, due to the poor combustion performance at these engine loads. The HC and CO emission shares become even higher for the airport in total. During take off the emissions of NO_x are high due to the high engine combustion temperature.

In opposition to particulate emissions by mass (PM), handling equipment is a small source for particle numbers (PN) at the inner apron area, due to the generally very low emission factors (#/kg fuel) for handling engines compared to aircraft engines. The PN emission share for handling equipment amounts to only 2.5 %. The largest emission share is calculated for APU (54 %). For main engines the emission share becomes slightly smaller (43 %). For the total airport main engines is the dominant source. The emission share for APU's is the same as the one for fuel consumption (around 5 %). The contribution from road transport is negligible (See Figure 4) and therefore left out in the following.

Some uncertainty exists in the calculated particle numbers for main engines and APU. This is due to a large variation in the reported particle number factors (#/kg fuel); variations caused by method difficulties and generally varying measurement conditions, and for APU especially due to the low number of available data. It is difficult to make a precise quantification of the emitted particle numbers based on measurements, due to the physical and chemical conversion that takes places in the exhaust plume and rapidly change the number of particles as the exhaust plume gradually disperses and cools down. For comparison the change in particle mass is much smaller during the dispersion and cooling of the exhaust plume. Other factors that influences the #/kg fuel factor is the distance of the measurement equipment to the passing aircraft, exhaust plume evolution, meteorological conditions (wind direction and speed, ambient air temperature and humidity), the sulphur content of the jet fuel and the measurement apparatus and associated uncertainties. Consequently the relative particle number importance of main engines and APU might change if new emission information becomes available, whereas no major change is expected in the conclusion, that handling equipment only plays a minor role in relation to particle number emissions in the airport.

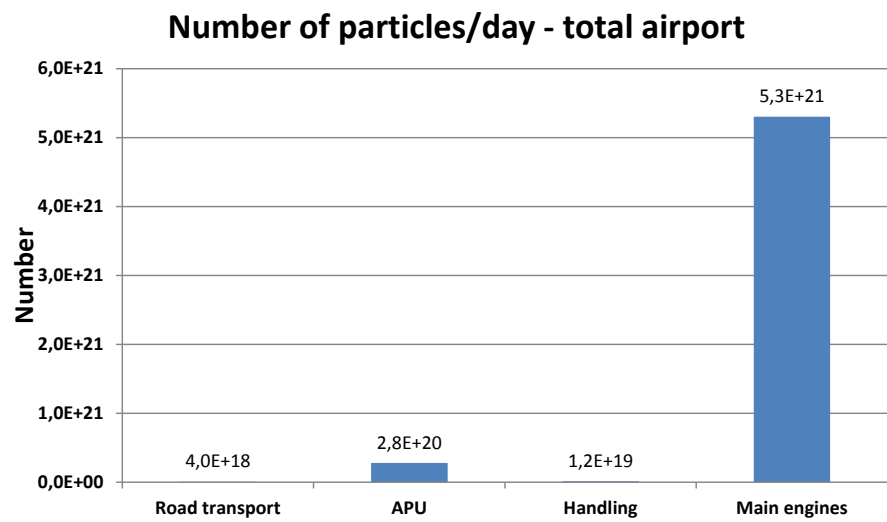
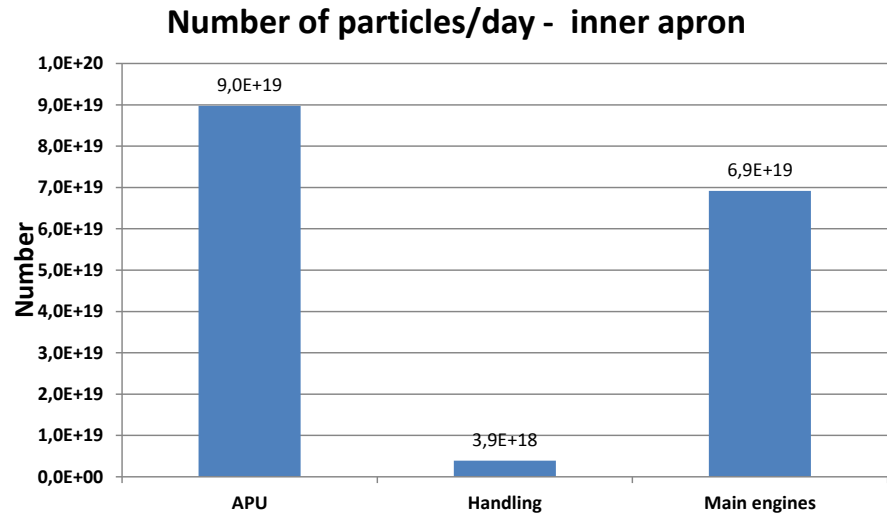


Figure 4. Emissions of number of particles per day for the inner apron and the total airport for road transport, APU, handling and main engines.

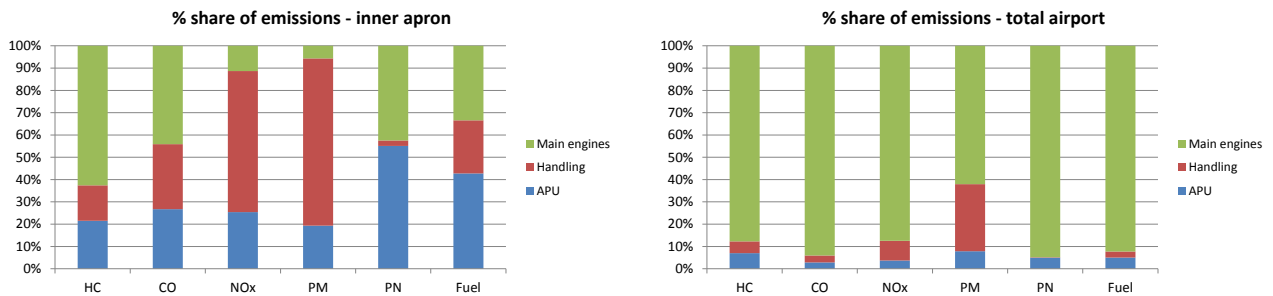


Figure 5. Percentage shares of fuel consumption and emissions for the inner apron (left) and the total airport (right). HC = hydrocarbons.



Figure 6. The limited part of the apron area ("inner apron") situated between the terminal fingers.

Figure 7 shows the particle emissions (mass) for the entire airport related to the three main sources and road transportation vehicles. According to the fuel declarations from the airport refueling company, the average sulfur content in jet fuel is 942 ppm. This sulfur content has been used in the calculation of jet engine particle emission factors, of which particle-bound sulfate has a large share. Consequently, particle emissions are expected to be reduced by more than 50% by mass if all sulfur is removed from the jet fuel. In this context it should be mentioned, that the particle emissions from the APU's would probably also decrease, if jet fuel with low sulfur content is used. Apparent from Figure 7, the contribution from road transport is very small. A change in fuel sulfur content is expected to influence the number of particles in about the same way as for particle mass.

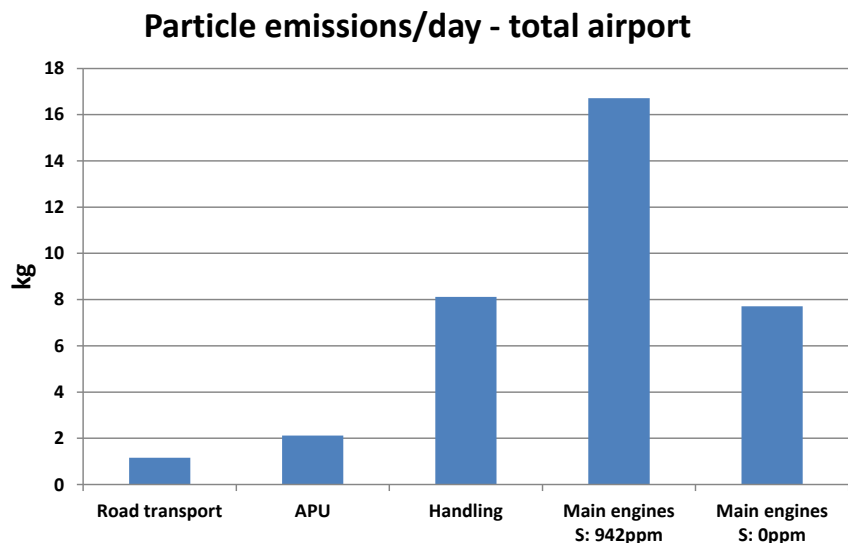


Figure 7. Particle emissions (kg per day) for the total airport for road transport, APU, handling, main engines using normal sulfur jet fuel (ME %S) and main engines using zero sulfur jet fuel (ME 0% S).

Forord

Nærværende projekt er udført af *DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi*, Aarhus Universitet for Københavns Lufthavne A/S i løbet af foråret 2013.

Medarbejdere i lufthavnen takkes for godt samarbejde omkring gennemførelse af undersøgelsen. John Kinsey, USEPA North Carolina, Prem Lobo, Missouri University of Science and Technology, Richard Miake-Lye, Aerodyne Research og Emanuel Fleuti, Zürich Lufthavn, skal takkes for tekniske diskussioner vedrørende partikelmålinger og tilsendelse af data til brug for projektets partikelberegninger.

1 Indledning

Nærværende rapport er udarbejdet for Københavns Lufthavne A/S af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet. Rapporten sammenfatter og dokumenterer resultaterne fra DCE's opgørelse af udledningerne af partikler (angivet ved antal partikler) fra flyenes hovedmotorer, hjælpemotorer (APU, Auxiliary Power Unit), handlingsgrej og vejgående køretøjer i Københavns Lufthavn. Opgørelsen er udarbejdet i relation til arbejdsmiljø, og der har derfor været særlig fokus på opgørelse af udledningerne på forpladsen i lufthavnen. Undersøgelsen er udført for Københavns Lufthavne A/S i løbet af foråret 2013.

Arbejdet bygger oven på de tidligere undersøgelser, som DCE gennemførte i perioden 2009-2011 med det formål at undersøge niveauet af luftforurening på forpladsen i Københavns Lufthavn på basis af emissionsopgørelser, målinger og modelberegninger (<http://www2.dmu.dk/Pub/TR5.pdf>), herunder at kvantificere kilderne til luftforureningen på forpladsen. Resultaterne fra emissionsopgørelserne er vist i nærværende rapport.

Den første undersøgelse omfattede de luftforureningskomponenter, som udledes fra kilder på forpladsen og som potentielt set kan give anledning til sundhedsskadelige effekter i forbindelse med arbejde på forpladsen. Undersøgelsen inkluderede derfor –udover andre stoffer - målinger af både $PM_{2,5}$ (massen af partikler med diameter under $2,5 \mu m$) og størrelsesfordelingen af partikler (partikeldiameter mellem 10 og 700 nm). Undersøgelsen omfattede imidlertid kun en opgørelse af udledningerne af $PM_{2,5}$, mens der ikke blev lavet en opgørelse over antallet af udledte partikler.

Resultaterne fra målingerne viste et højt antal partikler på forpladsen sammenlignet med tilsvarende tal fra målestationerne i København, herunder ved gademålestationen på H. C. Andersens Boulevard. For at få viden om kilderne til det høje partikelantal på forpladsen har Københavns Lufthavne A/S derfor iværksat nærværende projekt med det mål at få udarbejdet en opgørelse over udledningerne af partikler angivet ved antallet af partikler.

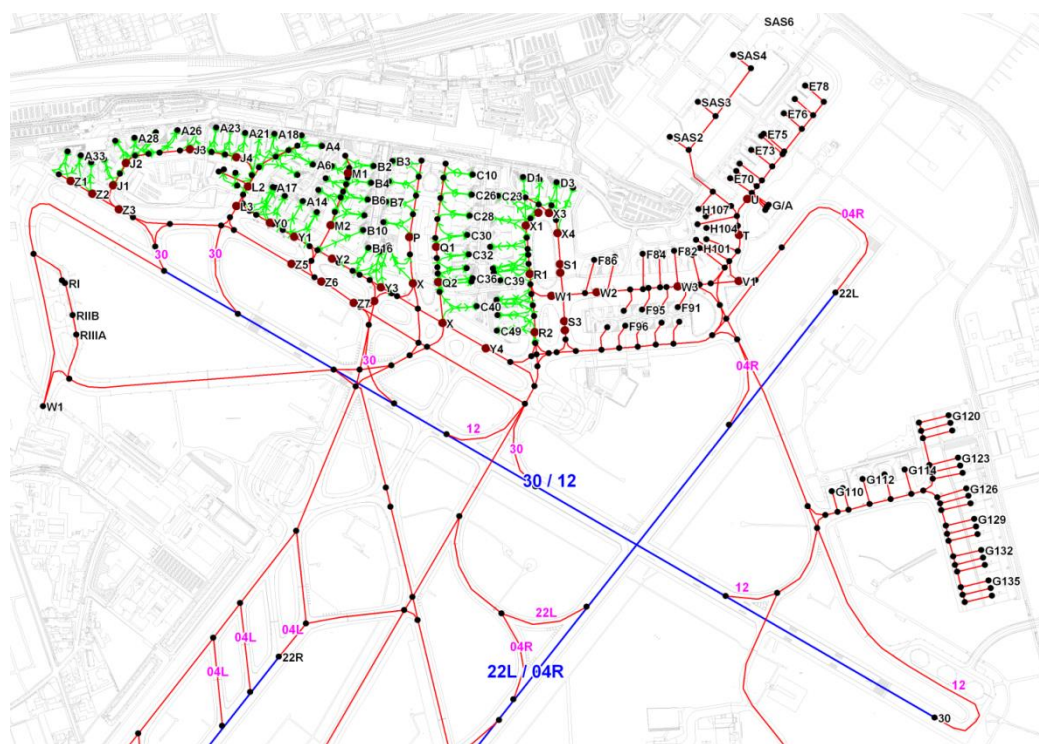
For at sætte resultaterne fra nærværende undersøgelse i forhold til udledningerne af de øvrige forureningskomponenter inkluderer rapporten en del af den dokumentation og de resultater, som blev rapporteret i forbindelse med den første undersøgelse.

2 Emissionsopgørelse

Emissionsopgørelsen for lufthavnen indeholder brændstofforbrug og emissioner fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpemotorer (APU, Auxiliary Power Unit), handlingsgrej og vejgående køretøjer. Opgørelsen er detaljeret opdelt i et 5 m x 5 m gridsystem, og indeholder hver celles aktivitetsopdelte brændstofforbrug og emissioner, med angivelse af tidspunkt for de enkelte udslip. Emissionskomponenterne inkluderet i opgørelsen er CO₂, SO₂, CO, HC, NO_x, N₂O og partikler opgjort efter masse (PM) og antal (PN).

Opgørelsens fremgangsmåde har været at fremskaffe detaljerede bestands- og driftsinformationer for fly, handlingsgrej og vejgående køretøjer, der benyttes i lufthavnen samt oplysninger om tid og sted for deres aktiviteter. Efterfølgende er oplysningerne digitaliseret ind på et elektronisk kort over lufthavnen (Figur 2.1). For flyene er motorspecifikke emissionsfaktorer beregnet og for handlingsgrejet er emissionsfaktorer fastlagt mht. alder, motorstørrelse, drivmiddel og motorbelastning. Ved at kombinere emissionsfaktorer og driftstider er emissionsrater i g pr. sekund afledt. De endelige emissioner beregnes som produktet af emissionsraten og tidsrum for aktiviteten i den enkelte celle.

Flydigitaliseringsmodellen og modellerne til beregning af emissionsfaktorer og samlede emissioner i dette projekt er videreudviklet ud fra modeller opbygget i et tidligere projekt til undersøgelse af lugtgener fra flymotorer og APU i Københavns Lufthavn (Winther et al., 2006).

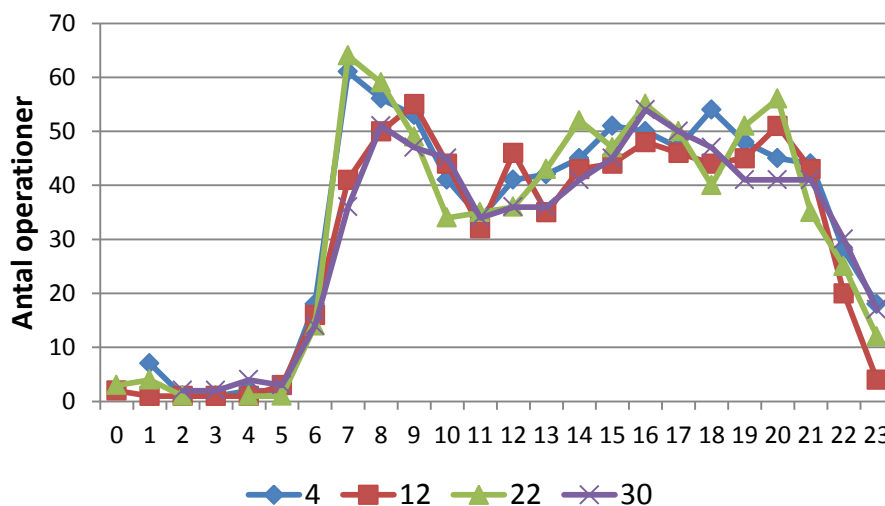


Figur 2.1. Detaljeret kort over Københavns Lufthavn med angivelse af standpladser (sorte punkter angivet med bogstaverne A-E og et tal), opstartsmærker (brune punkter), rulleveje (røde linjer eller grønne linjer tæt ved standpladserne) og et udsnit af start og landingsbaner (blå linjer).

2.1 Aktivitetsdata

Flyoperationer

Til brug for projektet har Københavns Lufthavn oplyst data for flyaktiviteten i fire døgn i 2009 med fortrinsvis brug af hver af de fire baneretninger 12, 30, 04 (Left/Right) og 22 (Left/Right). I data indgår bl.a. flytype, registreringsnummer, flyoperatør, standplads, off/on block tid, angivelse af start-/landingstidspunkt for start/landing og bane. Figur 2.2 viser det samlede antal operationer pr. time (alle operationsdata) fordelt over døgnnet.



Figur 2.2. Antal operationer pr time for fire døgn i Københavns Lufthavn efter primær baneanvendelse.

Brug af APU

Tidsrummet for brugen af hjælpemotorer (APU: Auxiliary Power Unit) i projektet følger de tidsrum, der er anvist af ICAO (International Civil Aviation Organization) i "Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889)" (ICAO, 2007). ICAO's anslåede APU tidsrum er vist i Tabel 2.1. ICAO opdeler den samlede før off block APU tid i "APU start up" og "Boarding", der svarer til forskellige APU belastninger. Antal flymotorer (hovedmotorer) for hver af flytyperne, der benyttes i lufthavnen kan ses i Bilag 1 Tabel B.1.

Tabel 2.1. Tidsrum (sekunder) for forskellige driftsfaser for flyenes APU.

APU belastning →	Ankomst	APU opstart	Boarding	Under push-back	Hovedmotorstart
	Normal	Opstart	Normal	Normal	Høj
Antal flymotorer	s	s	s	s	s
2	300	180	216	Beregnes	35
4	300	180	318	Beregnes	140

For flyafgange er ICAO's anslåede tidsrum vist i Tabel 2.1 samlet set lidt større end de normale 5 minutters APU drift før off-block tidspunktet, som Københavns Lufthavn generelt tillader. Det skal bemærkes, at lufthavnen giver tilladelse til at bruge APU i længere tid end 5 minutter før off block tid, når udetemperaturen er hhv. under -10 °C og over 25 °C. I disse tilfælde er de tilladte tidsrum i Københavns Lufthavn 45 minutter for store fly og 15 minutter for små fly.

Brugen af lidt større APU tidsrum før off block tidspunktet i beregningen end de normale 5 minutter kan altså retfærdiggøres over et helt år, da der alene pga. vejret vil være perioder i lufthavnen, hvor flyenes APU er i drift i længere tid.

Efter off block, når flyet trækkes frem til opstartsmærket regnes med APU i normal drift frem til opstartsmærket. Ved opstartsmærket står flyet stille under motoropstart (i det angivne tidsrum), og APU'en kører ved høj belastning.

Opstart af hovedmotorer

Figur 2.1 viser detaljeret kort over terminalområdet med afmærkning af standpladser, opstartsmærker for hovedmotorer, rulleveje og et udsnit af start/landingsbanerne. I modelberegningerne bruges som generelt princip, at flyene bliver trukket af push-back traktoren med ca. 5 km/t (1,5 m/s) langs de grønne linjer hen til det første opstartsmærke, hvorefter flyene starter hovedmotorerne. Specielt mellem fingrene gælder, at fly parkeret bag opstartsmærke M1 (standplads B2 og A7) starter ved opstartsmærke M1, fly parkeret ved B4, B6, B8 og B10 samt A9 og A11 starter ved opstartsmærke M2, fly parkeret ved B3, B5, B7 og B9 starter ved opstartsmærke P, fly parkeret ved C10, C26, C28, C30 og C32 starter ved opstartsmærke Q1 og fly parkeret ved C34, C36 og C38 starter ved opstartsmærke Q2.

Et af handlingsselskaberne i lufthavnen oplyser, at når flyene ikke er parkeret ved de ovenfor nævnte standpladser – altså med forbindelse til opstartsmærkerne M1, M2, P, Q1 og Q2 – starter flyene dette selskab handler, en af hovedmotorerne allerede på off-block tidspunktet ved standpladsen. Denne motor er tændt samtidigt med, at push-back traktoren trækker flyet frem til opstartsmærket, hvor den anden motor tændes. Disse standpladsnumre er også angivet i af Bilag 1 Tabel B.2. For at lette beregningerne allokeres APU'ens driftstid under hovedmotorstart til opstartsmærket også i disse tilfælde.

Brug af handlingskøretøjer

Handlingsselskaberne i Københavns Lufthavn har til brug for projektet opstillet et skema over de anvendte grejtyper, tidsrum og gennemsnitlig motorbelastning for handlingskøretøjerne, der benyttes ved flyhandling i lufthavnen. Handlingsskemaet, der er vist i Tabel 2.2, er opdelt i overordnede flygrupper med bogstavbetegnelserne B-E, for flytyper der indgår i projektets operationsdata. Flytypernes flygruppebenævnelser er anvist af lufthavnen, og er listet i Bilag 1 Tabel B.1.

Tabel 2.2. Grejtyper, driftstider og lastfaktorer for handlingsmateriellet i Københavns Lufthavn

Flygruppe →	Ankomst				Start				
	B	C	D	E	B	C	D	E	
Handlingsperiode (min) →	15	20	30	40	15	20	30	40	
Type handlingsgrej	Arbejdsperiode (min)				Arbejdsperiode (min)				Lastfaktor
Bagagetraktor	9	10	15	25	9	10	15	25	0,15
Bagagebånd	10	20	20	20	10	20	20	20	0,15
Push-back ved gate	0	0	0	0	10	10	10	10	0,15
Push-back bevægelse ^a	0	0	0	0	Beregn,	Beregn,	Beregn,	Beregn,	0,75
Container loader	0	15	27,5	35	0	15	27,5	35	0,45
Container transportør	0	15	27,5	35	0	15	27,5	35	0,35
Fuel (dispenser truck)	10	15	30	50 ^b	0	0	0	0	0,1
Fuel (refuelling truck)	10	15	30	50 ^b	0	0	0	0	0,1
Cleaning high loader	0	0	10	15	0	0	10	15	0,45
Cargo/Post traktor	0	5	5	5	0	5	5	5	0,15
Toiletbil	0	0	0	0	0	10	20	20	0,25
Catering B/C/D/E	1	3	5	5	0	0	0	0	0,1/0,2/0,22/0,22 ^c
Vandbil	0	0	0	0	0	7,5	15	15	0,25

^a Tidsrum afhænger af afstanden mellem standplads og opstartsmærke og beregnes i modellen

^b Angives af DRS (Danish Refueling Services) til at være 50 min. Der tages hensyn til dette i emissionsberegningerne

^c For flygrupperne B/C/D/E

Det er antaget, at toiletbil og vandbil bruges ved handling før start, mens catering og brændstofpåfyldning af flyene sker ved handling efter landing. Der benyttes tankvogn til brændstofpåfyldning af flyene på de standpladser, hvor der ikke er lagt brændstoffør. Disse standpladsnumre er angivet i af Bilag 1 Tabel B.2.

Push-back traktorerne bruges til at trække fly med jetmotor fra standpladsen og frem til de specielt afmærkede opstartsmærker i lufthavnen, hvor hovedmotorerne generelt skal startes. Lufthavnen angiver at flybugseringen frem til opstartsmærket sker med en hastighed på ca. 5 km/t (1,5 m/s), tidsrummet for brugen af push-back traktoren efter off-block afhænger derfor for hver flyafgang af afstanden mellem standplads og opstartsmærke. Standpladser hvor push back traktorer bruges er angivet i af Bilag 1 Tabel B.2.

En liste med handlingsselskab for de enkelte flyoperatører er vist i af Bilag 1 Tabel B.3. Handlingsselskaberne har også angivet samlede lister over grej, der benyttes i Københavns Lufthavn med angivelse af grejtypenummer, brændstofftype, motorstørrelse og årgang/motornorm. Listerne, der omfatter 643 forskellige handlingskøretøjer, er dog ikke vist i denne rapport.

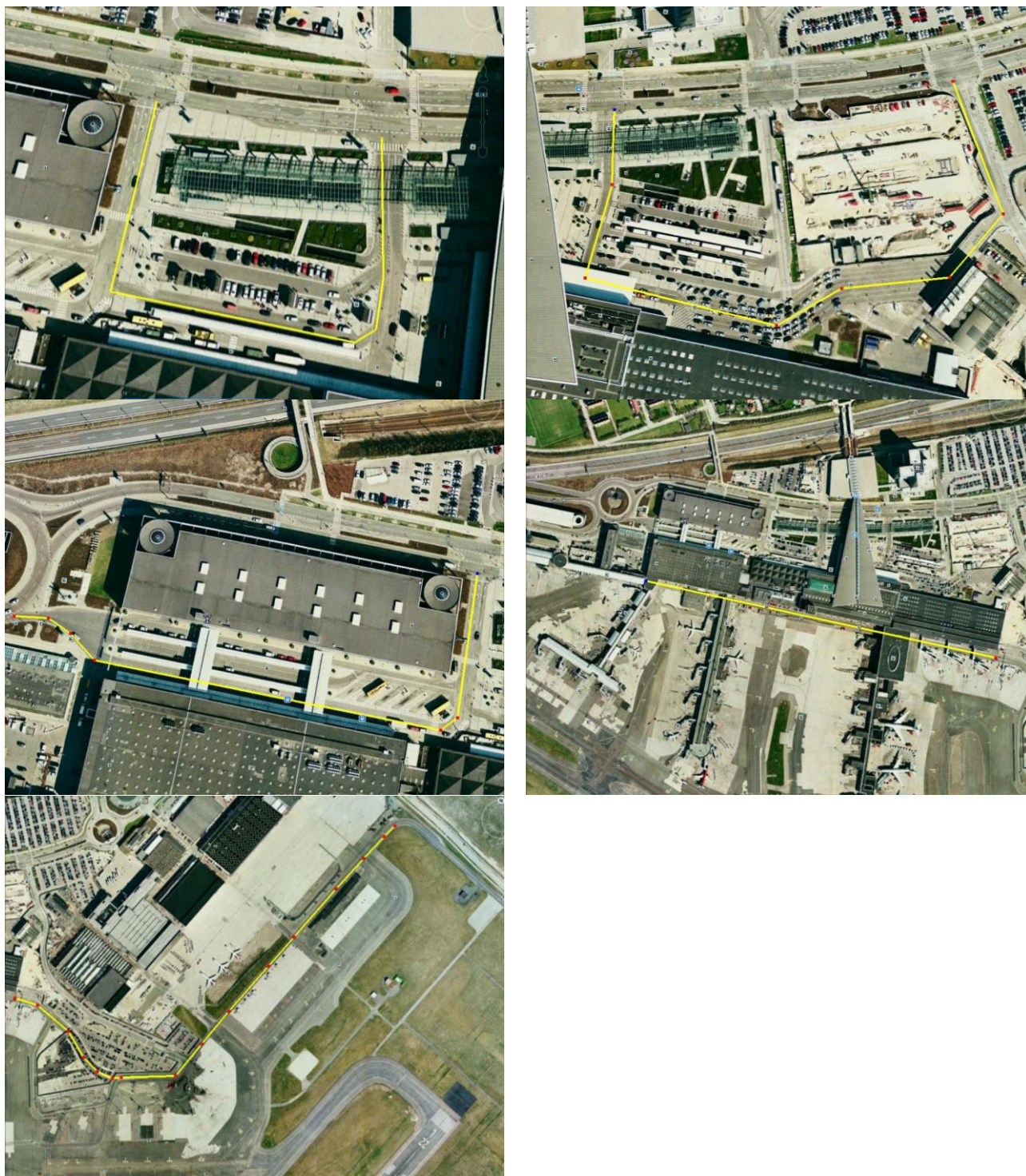
Kørende trafik

Københavns Lufthavn A/S har tilvejebragt trafiktællinger i 15 minutters intervaller for et helt døgn optalt ud fra overvågningsbilleder i lufthavnen for den kørende trafik (Tabel 2.3). Kørestrækningen for hver af de fem overvågningszoner er opmålt fra satellitbilleder (Figur 2.3).

Tabel 2.3. Resultater fra trafikoptælling på udvalgte trafikovervågningszoner i og omkring Københavns Lufthavn.

	Kameraplacering	Strækning	Tomgang	Hastighed	Antal køretøjer					
					Varebil- Minibus	Lastbil	Rutebus	Turistbus	Lastbil/Bus vogn	Bagage-
	km	Min	Km/h	Personbil						
Hilton	0,46	10 (taxi)/0	Lav/0	5000 ¹	328	13	0	54	0	0
Busterminal v. T2	0,32	0	Lav	3607	440	29	339	42	0	0
Drop Off v. T3	0,26	0	Lav	2092	270	16	0	5	0	0
Finger B-C	0,65	0	Lav	470	2115	0	0	0	160	2292
Check Øst	1,10	5	0/40	193	629	0	0	0	205	59

¹Heraf 3000 taxier.



Figur 2.3. De undersøgte zoner for kørende trafik i Københavns Lufthavn

Det er anslået at taxier på taxiholdepladsen (kameraplacering Hilton) i gennemsnit holder 10 minutter i tomgang, og at taxiandelen af personbiler, der gennemkører strækningen i overvågningszonen er 60 %. Ved Check Point Øst (kameraplacering Check Øst) antages alle køretøjer at holde 5 minutter i tomgang, før de kører videre ind på lufthavnsområdet, hvor gennemsnitshastigheden anslås til at være ca. 40 km/t. Hastigheden i alle andre overvågningszoner regnes som lav for alle køretøjstyper.

Sammensætningen af alle køretøjskategorier antages at svare til landsgennemsnittet, hvad angår køretøjsalder, drivmiddeltype og motorstørrelse. Sammensætningen af bagagevogne afspejler som gennemsnit de bagagevogne, der bruges ved flyhandlingen, mht. teknologiniveau, drivmiddel og motorstørrelse (jf. afsnit "Brug af handlingskøretøjer").

2.2 Digitalisering af aktivitetsdata

Tabel 2.4 viser inddelingen af operationstyperne udført med de enkelte motortyper samt den tilhørende motorbelastning, der er benyttet ved digitaliseringen af bevægelser med fly (hovedmotorer og APU) og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn.

Tabel 2.4. Motortyper, operationstyper og motorbelastning for brug af motorer i Københavns Lufthavn

Motor	Operationstype	Motorbelastning
APU	APU ankomst	Normal running
APU	APU opstart	Start-up
APU	APU boarding	Normal running
APU	APU hovedmotorstart	High load
APU	APU ved push back	Normal running
Handling	Handling ankomst	GSE
Handling	Handling afgang	GSE
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)	Idle
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)	Idle
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle
Push back	Push back i fart	GSE
Push back	Push back ved standplads	GSE

Flyoperationer

Til projektet har Københavns Lufthavne A/S fremsendt et elektronisk kort over lufthavnens område og har oplyst data for flyaktiviteten i fire hverdagsdøgn med fortrinsvis brug af hver af de fire startbaneretninger 04, 22, 12 og 30. I data indgår flytype, registreringsnummer, standplads, off/on block tid, angivelse af start/landing, tidspunkt for start/landing og baneanvendelse. Ved den efterfølgende digitalisering er der brugt et gitternet på 5x5 m til understøtning af de videre spredningsberegninger.

På Figur 2.1 er alle standpladser markeret med nummerbetegnelse. Opstartsmærkerne er markeret som røde punkter, og flyenes rulleveje tæt ved standpladserne er markeret med grønne og røde linjer frem til de fælles rulleveje, der er markeret med røde linjer. De øvrige sorte punkter er knuder i det digitaliserede vejnet. De seks start/landingsbaner 22L, 22R, 04L, 04R, 12 og 30 er nummereret efter kompasretningen og med højre/venstre betegnelse til skelnen mellem de to parallelle baner. Fra hver standplads er der tegnet en rute, der fører hen til det fælles start-/slutpunkt for passende grupper af standpladsers videre taxi ad præferencerulleveje til/fra start/landingsbanerne.

Hovedmotorernes længdemæssige placering henregnes til flyets midtpunkt. Flydimensionerne for de forskellige flytyper fremgår af Bilag 1 Tabel B.1.

Taxi før start

Dokumentation fra Københavns Lufthavne A/S i forbindelse med kortlægning af støjproblemer er brugt til at fastlægge præferencerullevejene (Svane et al., 1997). Til at fastlægge tidsforløbet og opholdet i de enkelte beregningsceller er som udgangspunkt brugt en fast taxihastighed på 8 m/s for alle fly. For hver taxitur mod start findes også en beregnet taxihastighed ud fra følgende ligning:

$$v_{taxi} = \frac{l_r}{(t_s - t_{ob})} \quad (1)$$

Hvor v_{taxi} = beregnet taxihastighed, l_r = rullevejslængde, t_s = tidspunkt for start, t_{ob} = off-block tid. I tilfælde hvor den beregnede taxihastighed er mindre end 8 m/s, regnes forskellen mellem taxitid ved 8 m/s og den sande taxitid som køtid på startstedet. Er den beregnede taxihastighed højere end 8 m/s, bruges den beregnede taxihastighed.

Start

Til beskrivelse af bevægelsen på startbanen anviser lufthavnsselskabet oplysninger om brugt banelængde under accelerationen og sluthastigheden, når hjulene slipper asfalten (pers. comm, Jeppesen, 2003). Flyene opdeles til dette brug i de samme seks vægtklasser; 0-30, 30-50, 50-70, 70-120, 120-300 og > 300 tons maksimal startvægt (MTOW), som benyttes i lufthavnens støj-beregninger (Svane et al., 1997). For at kunne finde hvert flys tidsrum i hver beregningscelle, skal accelerationen findes ud fra følgende ligning:

$$a_s = \frac{v_s^2}{2 \cdot l_s} \quad (2)$$

hvor a_s = acceleration, v_s = sluthastighed, l_s = forbrugt banelængde.

Stigning

Flyets bevægelse op til en lodret højde på 100 meter over startbanen medtages i digitaliseringen. I vandret plan beskrives flyets kurs som en lineær forlængelse af startbanen. Flyets fart antages at være konstant fra hjulene slipper startbanen og til det tidspunkt hvor flyet er steget 100 meter. For de seks vægtklasser regnes med stigningsprocenter, der øges fra 8 til 18 %, i spring af 2 %, med faldende vægtklasser. Medtagelsen af den første del af flyenes stigning forlænger området med luftemissioner fra flyene med mellem 556 og 1250 meter i vandret plan afhængig af flyenes vægt.

Indflyvning

Under indflyvning medtages flyets bevægelse fra en lodret højde på 100 meter over landingsbanen. Hastigheden antages at være konstant og lig hastigheden, når hjulene berører asfalten ved landing. I vandret plan antages flyets kurs at være en ret linje sammenfaldende med landingsbanens orientering. Medtagelsen strækker området med luftemissioner fra flyene til omkring 3300 meter regnet i vandret plan.

Landing

Stedet på banen for landing antages at være det samme som stedet for start, når samme bane bruges til den omvendte operation. Ved landing findes hastigheden, når hjulene berører asfalten i de seks vægtklasser, som omtalt ved beskrivelsen af flyenes start (personlig kommunikation Jeppesen, 2003). Det antages, at nedbremsningen sker med en konstant deceleration, der numerisk set er den samme som startaccelerationen. Decelerationen antages at fortsætte, indtil flyenes hastighed kommer ned på 20 m/s. Denne hastighed fortsætter flyene med, indtil første afkørselsmulighed opstår, hvorefter taxi-hastigheden findes ud fra førnævnte formel. Den forbrugte banelængde ved nedbremsning til 20 m/s findes som:

$$l_L = \frac{v_L^2 - v_{20}^2}{2 \cdot a_L} \quad (3)$$

hvor a_L = acceleration, v_L = landingshastighed, v_{20} = hastighed efter nedbremsning (20 m/s), l_L = forbrugt banelængde under nedbremsning.

Taxitur efter landing

Efter afkørsel fra landingsbanen findes taxihastigheden som:

$$v_{taxi} = \frac{l_r}{(t_{ob} - t_s)} \quad (4)$$

Hvor v_{taxi} = beregnet taxihastighed, l_r = rullevejslængde, t_s = tidspunkt for afkørsel, t_{ob} = on-block tid. I modsætning til taxituren før start bruges der ikke en fast taxihastighed efter landing. Den beregnede hastighed kan godt være større end 8 m/s, og omvendt vil en evt. køtid blot bidrage til at sænke den gennemsnitlige taxihastighed.

APU, push-back traktor og hovedmotor opstart

Brugen af APU efter ankomst, under APU opstart og ved boarding sker ved standpladsen (jf. Tabel 2.1). APU'ens højdemæssige placering er for alle flytyper anslået til halvdelen af halerorets højde. APU'ens længdemæssige placering regnes for nemheds skyld til flyets midtpunkt. Flydimensionerne for de forskellige flytyper fremgår af Bilag 1 Tabel B.1.

Push-back traktoren med APU i drift (og i visse tilfælde med en enkelt hovedmotor tændt) bevæger sig fra den enkelte standplads og frem til det tilknyttede opstartsmærke (jf. afsnit "Opstart af hovedmotorer"). Hastigheden er ca. 5 km/t (1,5 m/s) og foregår langs de grønne linjer vist på Figur 2.1. Den længdemæssige placering af push-back traktoren og hovedmotorens udstødning regnes også for nemheds skyld til flyets midtpunkt. Ved opstartsmærket står flyet stille under hovedmotoropstart (jævnfør afsnit "Opstart af hovedmotorer").

Brug af handlingskøretøjer

Det er vanskeligt at fastslå præcist, hvornår de enkelte grejtyper benyttes ved handlingen af flyene i forbindelse med ankomst og afgang. Brugen af grejtyperne midles derfor ud over hele handlingsperioden for hhv. ankomst og afgang.

En undtagelse gælder dog for push-back traktorerne, der af handlingselskaberne anslås at være i brug i ca. 10 minutter op til flyets off-block tidspunkt ved de standpladser, hvor flyene skal trækkes ud.

Det antages ud fra handlingselskabernes oplysninger, at handlingsaktiviteterne foregår på højre side af flyet, indenfor et areal der udspændes af flyets længde og højre vingebredde.

2.3 Emissionsfaktorer

Hovedmotorer

Til brug for de videre brændstof- og emissionsberegninger skal faktorer for brændstofforbrug og emissioner findes for de enkelte fly, der benytter lufthavnen. Ud fra flyets registreringsnummer findes oplysninger om de enkelte flys motorfabrikat (motor ID) og antal motorer i en global database "JP Airline-Fleets 2009/2010" over alle fly (www.flightglobal.com). Flyoperationerne for de fire døgn med aktivitetsdata fordeler sig på 595 forskellige flyregistreringsnumre og 102 forskellige motorer.

Næste skridt er at finde motorernes brændstofforbrug (FF; kg/s) og emissionsindekser (EI; g/kg fuel) for belastningen ved taxifart og start. For jetmotorer med en trykkraft over 26,7 kN kan data findes i ICAOs Engine Exhaust Emission Database for (www.caa.co.uk). For turbopropmotorer bruges en emissionsdatabase, der vedligeholdes af FOI (Totalförsvarets Forskningsinstitut, www.foi.se) i Sverige. Emissionsdata for små jettfly tages fra EMEP/EEA (2009).

Emissionsdatabaserne indeholder EI'er for CO, HC og NO_x, og NO₂ fraktionen af samlet NO_x tages fra målinger udført af Herndon et al. (2004). For mange af jetmotorerne i ICAO's emissionsdatabase er der ligeledes angivet et sodtal (Soot Number: SN). Partikelemissionen er ikke angivet for den enkelte motor, men skal i stedet beregnes ud fra ICAO's FOA3.0 metode (First Order Approximation method 3.0) (ICAO, 2011). Partikelbidragene skal beregnes for hhv. sod og kulbrinter i udstødningen samt flybrændstoffets indhold af svovl.

Partikelbidrag fra sod

Beregningsen af de ikke-flygtige (non volatile) partikelemissioner relateret til motorernes sodemission er detaljeret beskrevet i ICAO (2011). Metoden benytter motorernes SN værdier, og de benyttede beregningsudtryk skelner mellem turbofan (TF) og mixed turbofan (MTF) motorer. For de motorer, hvor der ikke angives en SN værdi i ICAO's emissionsdatabase, er en SN værdi antaget for en motor af tilsvarende fabrikat og størrelse.

Massen af partikler pr. m³ luft for 1 kg forbrugt brændstof er eksperimentelt bestemt som funktion af SN og angives ved følgende ligning for SN ≤ 30⁷.

⁷ I praksis er SN tallet mindre end 30 for alle flymotorer der bruges i lufthavnen

$$CI = 0,0694 \cdot SN^{1,234} \quad (5)$$

CI = masse af partikler pr. m³ luft for 1 kg brændstof

SN = Soot Number

Derudover bestemmes luftflowet pr. kg brændstof for hhv. TF og MTF motorer ud fra følgende udtryk (6) og (7):

$$Q_{Core} = 0,776 \cdot AFR + 0,877 \quad (6)$$

$$Q_{Mixed} = 0,776 \cdot AFR \cdot (1 + BPR) + 0,877 \quad (7)$$

Q_{Core} = Volumetrisk luftflow for TF motorer (m³/kg fuel)

Q_{Mixed} = Volumetrisk luftflow for MTF motorer (m³/kg fuel)

AFR = Air Fuel Ratio; 106/83/51/45 for idle/approach/climb out/take off

BPR = By Pass Ratio

Herefter bestemmes emissionsindekset for partikler relateret til sod:

$$EI_{PM_{nv}} = CI \cdot Q \quad (8)$$

EI_{PM_{nv}} = Emissionsindeks for non volatile partikler (mg/kg fuel)

For turboprop fly benyttes data fra en schweizisk undersøgelse, hvor partikelemissionen fra turboprop motorer er fundet som funktion af motorstørrelse (Rindlisbacher, 2009):

$$EI_{PM_{nv}} = -4,8 \cdot 10^{-5} \cdot SHP^2 + 0,23664 \cdot SHP + 105,6, SHP \leq 2000 \text{ hk} \quad (9)$$

$$EI_{PM_{nv}} = 390, SHP > 2000 \text{ hk} \quad (10)$$

EI_{PM_{nv}} = Emissionsindeks for non volatile partikler (mg/kg fuel)

SHP = Shaft Horse Power (hk)

Partikelbidrag fra kulbrinter

Emissionsindekset for partikler relateret til kulbrinteemissionen findes for jetmotorer som:

$$EI_{PM_{vol-HC}}(X) = \frac{EI_{PM_{vol-HC_{CFM56}}}}{EI_{HC_{CFM56}}} \cdot EI_{HC}(X) \quad (11)$$

EI_{PM_{vol-HC}} = PM emissionsindeks relateret til kulbrinter målt for CFM56-2-C1 (mg/kg fuel)

EI_{HC_{CFM56}} = HC emissionsindeks for CFM56-2-C5 fra ICAO's emissionsdatabase (g/kg fuel)

EI_{HC}(X) = HC emissionsindeks for motortypen X fra ICAO's emissionsdatabase (g/kg fuel)

$EI_{PMvol-HC}$ værdierne er målt direkte for motortypen CFM56-2-C1 i det eksperimentielle måleprogram APEX (NASA, 2006). For motortypen CFM56-2-C5 angiver ICAO's emissionsdatabase HC indekser på 1,83/0,08/0,04/0,05 g/kg fuel for hhv. idle/approach/climb out/take off.

Der findes ikke tilgængelige data til at bestemme et emissionsindeks for turboprop motorer.

Partikelbidrag fra svovl

Emissionsindekset for partikler relateret til brændstoffets svovlindhold findes for jetmotorer som:

$$EI_{PMvol-FSC} = \frac{FSC \cdot \varepsilon \cdot MW_{out}}{MW_{Sulphur}} \cdot 10^6 \quad (12)$$

$EI_{PMvol-FSC}$ = Emissionsindeks for volatile partikler relateret til svovl (mg/kg fuel)

FSC = Fuel Sulphur Content (vægtprocent)

ε = svovlkonverteringsrate (procent)

MW_{out} = Molvægt af SO_4^{2-} (= 96)

$MW_{Sulphur}$ = Molvægt af S (= 32)

I ICAO (2011) anvises en ε værdi på 2,4 %, og på basis af et væsentligt antal brændstofleverancer er et gennemsnitligt svovlindhold på 0,0942 % (vægt) = 942 ppm fundet for flybrændstoffet i Københavns Lufthavn.

Der findes ikke tilgængelige data til at bestemme et emissionsindeks for turboprop motorer.

De endelige emissionsrater og brændstofforbrug (g/s) for det enkelte flys hovedmotorer beregnes som:

$$ER(ME)_{id,m} = N_{id} \cdot EI_{X,m} \cdot FF_{X,m} \quad (13)$$

ER (ME) = Emissionsrate/brændstofforbrug (g/s) for hovedmotorer

N = Antal motorer

EI = Emissionsindeks (g/kg fuel), NO_x , CO, HC: ICAO/FOI; partikler: (8)-(12)

FF = Fuel flow (kg fuel/s), ICAO/FOI

id = Flyregistreringsnr.

X = Motor id

m = Motorbelastning (Idle/Take off)

De beregnede rater for emissioner og brændstofforbrug for de 102 forskellige motorer i aktivitetsdata er ikke vist i denne rapport. I stedet er vægtede

gennemsnit for alle flyene i lufthavnen vist i Tabel 2.9 fordelt på de forskellige taxioperationstyper, landing og take off.

Antal partikler

Indenfor de seneste år der i flere lufthavne udført partikelmålinger i røgfanen fra flymotorers udstødning. En gennemgang af de publicerede data fra studierne viser en stor spredning i de målte værdier for partikelantallet pr kg fuel (EIn, angivet som #/kg fuel).

En usikkerhedsfaktor ved de rapporterede #/kg fuel værdier er at det er metodemæssigt vanskeligt at bestemme disse ud fra målinger, da der pga. fysiske og kemiske omdannelser sker en hurtig ændring i partikelantallet efterhånden som røgfanen afkøles og spredes. Til sammenligning sker der langt mindre ændringer i partikelmassen i forbindelse med spredningen af røgfanen. Udover dette, kan de store forskelle fra studie til studie skyldes forskelle i placeringen af måleapparatet i forhold til de passerende fly, røgfaneudvikling, meteorologiske forhold (vindretning og -hastighed, temperatur, luftfugtighed), svovlindholdet i flybrændstoffet samt de anvendte måleapparater og deres måleusikkerhed.

Minimum og maksimum værdierne for #/kg fuel målt i de forskellige studier ved motorbelastningerne idle og take off er vist i tabel 2.5. Pga. de store variationer i #/kg fuel mellem studierne, er det valgt at beregne gennemsnittet for idle (3,91E+16/kg fuel) og take off (4,62E+16/kg fuel), og benytte disse gennemsnit i den videre beregning. Gennemsnitsværdierne er også vist i tabel 2.5. Måledata fra Kinsey et al. (2010) blev også vurderet i projektet. Det var dog ikke umiddelbart muligt at aflede #/kg fuel fra måledata i denne reference.

Tabel 2.5. Minimum og maksimum værdier for EIn (#/kg fuel) ved idle og take off for forskellige studier samt gennemsnit for alle studier

Reference	Lufthavn	Flytype/motortype	Motorbelastning	EIn Min	EIn Max	EIn Middel
Mazaheri et al. (2009)	Brisbane	B737, B767, B777, A320, A330	Idle	3,29E+16	3,78E+16	
			Take off	2,09E+16	5,42E+16	
Mazaheri et al. (2011)	Brisbane	B737, B767, A320, A330	Idle	1,63E+15	8,36E+15	
			Take off	4,65E+16	3,15E+17	
Herndon et al. (2005)	Boston, Logan	-	Idle	2,10E+16		
			Take off	8,80E+15		
Herndon et al. (2008)	Atlanta, Hartsfield	CF34, JT8D, CFM56, PW2037, CF6	Idle	4,00E+15	8,20E+15	
			Take off	1,80E+15	5,60E+15	
Lobo et al. (2011)	Oakland	CFM56-3B/7B, V2500-A5, JT8D, CF6-50/80, CF34-3B	Idle	2,54E+16	2,09E+17	
			Take off	2,04E+16	7,08E+16	
Johnson et al. (2008)	Brisbane	B737	Idle	2,40E+16	3,70E+16	
			Take off	9,00E+15		
Zhu et al. (2011)	Los Angeles, LAX	-	Take off	3,40E+16		
Hu et al. (2009)	Santa Monica	-	Take off	5,00E+16		
All studies			Idle	1,82E+16	6,01E+16	3,91E+16
			Take off	2,39E+16	6,84E+16	4,62E+16

APU

Faktorer for fuelforbrug og emissionsfaktorer for CO, HC, NO_x og partikler angivet i kg/h for APU kommer fra ICAO (2011). NO₂ fraktionen af samlet NO_x kommer fra målinger udført af Schäfer et al. (2003). Faktorerne er vist i Bilag 1 Tabel B.4.

For partikelantal er der kun publiceret data fra et enkelt målestudie udført på en APU i en tilstrækkelig stor afstand fra motoren (Lobo et al., 2012b). Fra dette studie bruges hhv. $4,97E+16$ /kg fuel og $2,70E+16$ /kg fuel for motorbelastningerne idle og high load. Gennemsnitsværdien $3,84E+16$ /kg fuel bruges for motorbelastningen "normal running". Da der for APU kun er målinger fra et enkelt studie, kan #/kg fuel faktorerne ændre sig, når nye målresultater bliver tilgængelige.

APU-faktorerne for fuelforbrug, CO, HC og NO_x repræsenterer forskellige flystørrelser angivet ved sædekapacitet, og gamle/nye flytyper som vist i Tabel 2.6. Derudover detaljeres faktorerne efter APU'ens motorbelastning (jf. Tabel 2.1). For partikler skelnes mellem kort- og langdistance flytyper⁸. APU faktorerne er vist i Bilag 1 Tabel B.4. Ud fra JP Airline Fleets 2009/2010 databasens oplysninger om sædekapacitet for flyene i lufthavnen samt en generel vurdering af flytypens alder, inddeles flyene i Københavns Lufthavn i de relevante APU kategorier. Denne inddeling er vist i af Bilag 1 Tabel B.1.

Tabel 2.6. Gruppering af APU efter sædekapacitet og flytypealder

APU kategori
>300 sæder, ny
>300 sæder, gammel
100-200 sæder, ny
100-200 sæder, gammel
200-300 sæder
Business/Regional jet

De endelige emissionsrater og brændstofforbrug (g/s) for det enkelte flys APU afledes ud fra de relaterede kg/h faktorer.

$$ER(APU)_k = EI(APU)_k / 3,6 \quad (14)$$

ER (APU) = Emissionsrate/brændstofforbrug (g/s) for APU

EI (APU) = Emissionsfaktorer/brændstofforbrug (kg/h)

k = APU kategori

Vægtede gennemsnit for alle flyenes emissionsrater og brændstofforbrug vist i Tabel 2.9 fordelt på de forskellige APU operationstyper.

Opstart af hovedmotorer

HC emissionen ved opstart af hovedmotorer (jetmotorer) beregnes ud fra metoden, der benyttes i den tyske luftkvalitetsberegningsmodel for lufthavne LASPORT (LASat for airPorts), se Janicke (2010):

$$HC_{MStart} = \frac{P}{2000kN} + 0,08 \quad (15)$$

HC_{MStart} = Kulbrinteemission pr. motor ved motoropstart (kg)

P = motorstørrelse (kN)

⁸ For partikler anviser ICAO (2011) fuelrelaterede emissionsfaktorer for kort- og langdistance flytyper på hhv. 0,3125 og 0,1333 g/kg fuel. Flytyperne A330, A340, B767, B777 og B747 regnes som langdistance flytyper i beregningerne.

For nemheds skyld fordeles HC emissionerne ligeligt over APU tidsintervallet for motoropstart, der er vist i Tabel 2.1. Hermed fås HC emissionsraten (g/s) som:

$$ER(HC_{MEstart}) = HC_{MEstart} / \Delta T_{MEstart} \quad (16)$$

$ER(HC_{MEstart})$ = HC emissionsrate (g/s) for opstart af hovedmotorer

$\Delta T_{MEstart}$ = Tidsrum for hovedmotoropstart (Tabel 2.1)

De beregnede HC emissionsrater for jetflyene i lufthavnen fordelt på i alt 543 forskellige flyregistreringsnumre og 87 forskellige motortyper er ikke vist i denne rapport. I stedet er et vægtet gennemsnit for alle flyene vist i Tabel 2.9.

Handlingskøretøjer

Generelle emissionsfaktorer for motorerne der benyttes af de diesel- og benzindrevne handlingskøretøjer er opstillet i af Bilag 1 Tabel B.5. For dieselmotorer er faktorerne opdelt iht. EU's emissionslovgivning for hhv. non road (Stage I-IV) og vejtransport (Euro I-V). Tabel 2.7 viser den overordnede gruppering mht. drivmiddel og emissionstrin. For non road motorer er EU lovgivningens grænseværdier opdelt i seks motorstørrelsesintervaller, og disse er også brugt for ældre motorer. Motorstørrelsesintervallerne samt motorårgang pr. emissionstrin fremgår specifikt af Bilag 1 Tabel B.5.

Tabel 2.7. Gruppering af non road køretøjer mht. drivmiddel, lovgivning og emissionstrin

Brændstoftype	Lovgivning	Emissionstrin
Diesel	Non road	<1981
Diesel	Non road	1981-1990
Diesel	Non road	1991-Stage I
Diesel	Non road	Stage I
Diesel	Non road	Stage II
Diesel	Non road	Stage IIIA
Diesel	Non road	Stage IIIB
Diesel	Non road	Stage IV
Diesel	Vej	Euro 0
Diesel	Vej	Euro I
Diesel	Vej	Euro II
Diesel	Vej	Euro III
Diesel	Vej	Euro IV
Diesel	Vej	Euro V
Benzin	Vej	ECE 15/00-01 (> 2l.)
Benzin	Vej	Euro 1 (> 2l.)

For non road dieselmotorerne benyttes emissionsfaktorer (g/kWh) fra den officielle danske emissionsopgørelse, der indrapporteres til UNECE CLRTAP konventionen (Nielsen et al., 2010). For dieselmotorerne i de vejgående køretøjer benyttes EU's emissionsnormer direkte (g/kWh), angivet for den stationære testcyklus ESC (European Stationary Cycle), der gælder for alle motorstørrelser.

Gennemsnitlige emissionsrater og brændstofforbrug (g/s) pr. grejtype og flygruppe beregnes som:

$$ER(H)_{g,f} = \frac{\sum P_{id} \cdot lf_g \cdot EF_{y,z} \cdot \Delta T_g / \Delta H_{g,f} / 3600}{N_g} \quad (17)$$

ER(H) = Emissionsrate/brændstofforbrug (g/s) for handlingsgrej

P = Motorstørrelse (kW)

lf = Lastfaktor (%)

EF = Emissionsfaktor/brændstofforbrug (g/kWh)

ΔT = Handlingstid pr. grejtype (Tabel 2.2)

ΔH = Samlet handlingsperiode pr. flygruppe (Tabel 2.2)

N = Antal maskiner pr. grejtype

id = Grej id nummer

g = Grejtype

f = Flygruppe (B-E)

y = Motorstørrelseskategori

z = Emissionstrin

Bagagetraktorer er den eneste handlingsgrejtype i lufthavnen, hvor benzintorer bruges i en vis udstrækning. Her er det vurderet, at de ældste bagagetraktorer har en motorteknologi der svarer til benzinbiler fra 1970'erne, mens de nyeste bagagetraktorer har en motorteknologi der svarer til de ældste benzinbiler udstyret med trevejskatalysator (pers. comm. Robert Hagen, SGS, 2010). Efterfølgende er emissionsrater i g/s (også betegnet emissionsfaktorer) beregnet for disse motorteknologier ud fra grunddata i den danske emissionsopgørelse for vejtrafik⁹.

I modsætning til de vægtbaserede emissionsdata er emissionsdata for partikelantal meget sparsomt beskrevet for non road maskiner i den tilgængelige litteratur. Men da non road maskinernes motorer principielt set er de samme som for vejtrafikens køretøjer, dog med en vis forsinkelse i emissionskrav, kan de mere velbeskrevne emissionsdata for vejtrafikens køretøjer bruges som en tilnærmelse.

Til brug for undersøgelsen er emissionsfaktorer for partikelantal i #/km ved bykørsel taget fra den fælles-europæiske COPERT IV model (EMEP/EEA, 2009), der bruges til at beregne emissionsopgørelser for vejtrafik.

Køretøjernes emissionsfaktorer i #/km er omregnet til #/kg fuel ud fra køretøjernes brændstofføkonomi ved bykørsel (kg fuel/km). Som vist i tabel 2.8 ligger de afledte brændstoffrelaterede partikelantal-faktorer for dieselpersonbiler, varebiler, lastbiler og busser på nogenlunde samme niveau for de teknologitrin, der ikke har filtre påmonteret.

⁹ Emissionsraterne beregnes som produktet af emissionsfaktorerne (g/km) ved lav rejsehastighed, og rejsehastigheden (15 km/t), for hhv. ECE 15/00-01 og Euro 1 motorer, > 2 liter.

Tabel 2.8. Antal partikler #/km og #/kg fuel for forskellige køretøjskategorier

Kategori	Drivmiddel		Euro trin	#/km	#/kg fuel
Personbiler	Diesel		Euro 1	4,04E+14	6,504E+15
			Euro 2	2,12E+14	3,247E+15
			Euro 3	1,64E+14	2,637E+15
Personbiler	Benzin		Euro 1	8,76E+12	1,243E+14
			Euro 3	6,99E+11	9,669E+12
Lastbiler	Diesel	3,5-7,5 tons	Euro II-III	3,19E+14	3,115E+15
		7,5-14 tons	Euro II-III	6,78E+14	4,204E+15
		14-34 tons	Euro II-III	1,06E+15	3,813E+15
Rutebusser			Euro II-III	6,88E+14	2,46E+15
Turistbusser			Euro II-III	8,23E+14	2,73E+15

Da #/kg fuel-niveauerne er rimeligt ens og der i faktoromregningen er introduceret en vis usikkerhed ved valget af brændstoføkonomi for bykørsel, er det for alle typer af handlingsmateriel valgt at benytte faktoren 3,1E+15/kg fuel beregnet for Euro II/III lastbiler med totalvægt på mellem 3,5 og 7,5 tons.

Set i forhold til #/kg fuel faktorerne for flymotorer og APU er #/kg fuel faktorerne meget lave for vejtrafikkens køretøjer. De lave faktorer understøttes af nyere tunnelmålinger udført af Ban-Weiss et al. (2010), der finder 3,3E+15/kg fuel for dieselskøretøjer. Endnu lavere værdier er målt af Geller et al. (2006) på omtrent 5,2E+13 #/km for dieselskøretøjer og 2,5-3,6E+12 #/km for benzinskøretøjer. De lave #/kg fuel faktorer for vejtrafikskøretøjer bekræftes også af målinger udført ved Santa Monica Airport (Hu et al., 2009) og af målinger udført af USEPA på en lastbil (Kinsey et al., 2009).

De generelt lave niveauer for vejtrafikmotorer afspejles yderligere i EU kravene til de fremtidige Euro 6 motorer, der foreskriver brug af partikelfiltre. Således ligger EU kravene på 6E+12/km for nysolgte Euro 6 biler i de tre første år og 6E+11/km for nysolgte biler i de efterfølgende år.

Grunden til de store #/kg fuel forskelle mellem flymotorer/APU og vejtrafik, er bl.a. at vejtrafikmotorerne har en anden type forbrænding, der giver færre partikler i de mindste størrelser (se f.eks. ACI (2012)), samt at svovlindholdet i vejtrafik/non road diesel er meget lavere end i flybrændstof.

Da #/kg fuel faktorerne for vejtrafikmotorerne er meget lavere end for flymotorer og APU, og det ses i Tabel 2.8 for dieselpersonbiler, at gradvist nyere teknologittrin ikke giver væsentligt lavere #/kg fuel faktorer, vurderes det at være af mindre betydning, at der ikke har kunnet laves en præcis opdeling af #/kg fuel faktorerne på forskellige emissionstrin for non road maskinerne.

De beregnede rater for emissioner og brændstofforbrug for de 642 forskellige handlingskøretøjer i lufthavnen er ikke vist i denne rapport. I stedet er vægtede gennemsnit for alle handlingskøretøjerne vist i Tabel 2.9 for hhv. ankomst og afgang. Raterne angives endvidere separat for pushback traktorer ved standplads og i fart.

Afledte emissionsrater og –faktorer for hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer

Tabel 2.9 viser de afledte emissionsrater og brændstofforbrug (udledning per sekund) beregnet som vægtet gennemsnit for alle hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn. Bemærk at handlingskøretøjernes emissionsrate er beregnet som den samlede emission divideret med summen af alle handlingsperioderne for alle flygrupper. Tabel 2.10 viser emissionsfaktorerne per kg forbrændt brændstof.

Tabel 2.9. Afledte emissionsrater og brændstofforbrug for hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn

Motor	Operationstype	Motorbelastning	HC	CO	NO _x	NO ₂	PM	PN	Fuel
			g/s	g/s	g/s	g/s	g/s	#/s	g/s
APU	APU ankomst	Normal running	0,019	0,135	0,234	0,080	0,009	1,08E+15	29,1
APU	APU opstart	Start-up	0,376	0,668	0,114	0,039	0,006	9,57E+14	20,1
APU	APU boarding	Normal running	0,019	0,135	0,239	0,082	0,009	1,09E+15	29,4
APU	APU hovedmotorstart	High load	0,018	0,145	0,350	0,120	0,011	1,04E+15	39,4
APU	APU ved push back	Normal running	0,020	0,126	0,238	0,081	0,009	1,07E+15	28,9
Handling	Handling ankomst ^a	GSE	0,017	0,064	0,109	0,013	0,007	1,03E+13	3,3
Handling	Handling afgang ^a	GSE	0,024	0,086	0,155	0,017	0,010	1,32E+13	4,2
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle	0,537	4,960	0,938	0,295	0,026	8,43E+15	215,6
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle	0,518	4,754	0,887	0,279	0,025	8,02E+15	205,1
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)	Idle	0,527	4,985	0,958	0,302	0,026	8,63E+15	220,7
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)	Idle	0,513	4,895	0,953	0,300	0,026	8,53E+15	218,1
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle	0,588	4,592	0,801	0,252	0,024	7,32E+15	187,2
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off	0,140	1,160	51,147	16,111	0,342	9,50E+16	2058,0
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle	0,520	4,631	0,858	0,270	0,025	7,77E+15	198,6
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off	0,139	1,182	51,763	16,305	0,345	9,71E+16	2103,0
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle	7,663	5,782	1,140	0,359	0,028	1,01E+16	258,1
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle	0,281	3,121	0,467	0,147	0,011	4,38E+15	111,9
Push back	Push back i fart	GSE	0,015	0,065	0,267	0,030	0,009	2,32E+13	7,5
Push back	Push back ved standplads	GSE	0,003	0,013	0,053	0,006	0,002	4,64E+12	1,5

^{a)} Emissionsraten er beregnet som den samlede emission divideret med summen af alle handlingsperioderne for alle flygrupper

Tabel 2.10. Afledte brændstofrelaterede emissionsfaktorer for hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn.

Motor	Operationstype	Motorbelastning	HC	CO	NO _x	NO ₂	PM	PN
			g/kg fuel	g/ kg fuel	g/ kg fuel	g/ kg fuel	g/ kg fuel	#/kg fuel
APU	APU ankomst	Normal running	0,642	4,655	8,055	2,755	0,298	3,84E+16
APU	APU opstart	Start-up	18,733	33,301	5,685	1,944	0,300	4,97E+16
APU	APU boarding	Normal running	0,642	4,580	8,120	2,777	0,294	3,84E+16
APU	APU hovedmotorstart	High load	0,464	3,673	8,876	3,036	0,269	2,70E+16
APU	APU ved push back	Normal running	0,695	4,364	8,223	2,812	0,301	3,84E+16
Handling	Handling ankomst	GSE	5,246	19,400	32,949	3,791	2,206	3,10E+15
Handling	Handling afgang	GSE	5,563	20,162	36,487	4,041	2,294	3,10E+15
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle	2,489	23,007	4,350	1,370	0,119	3,91E+16
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle	2,526	23,179	4,325	1,362	0,122	3,91E+16
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)	Idle	2,387	22,586	4,342	1,368	0,117	3,91E+16
Hovedmotor	Landing (runway decel.)	Idle	2,353	22,440	4,369	1,376	0,120	3,91E+16
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle	3,141	24,523	4,275	1,347	0,127	3,91E+16
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off	0,068	0,564	24,853	7,829	0,166	4,62E+16
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle	2,620	23,317	4,319	1,361	0,124	3,91E+16
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off	0,066	0,562	24,614	7,753	0,164	4,62E+16
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle	29,684	22,397	4,414	1,391	0,109	3,91E+16
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle	2,511	27,891	4,177	1,316	0,096	3,91E+16
Push back	Push back i fart	GSE	2,037	8,651	35,689	4,027	1,239	3,10E+15
Push back	Push back ved standplads	GSE	2,021	8,612	35,517	4,010	1,234	3,10E+15

2.4 Kørende trafik

Sammensætningen af alle køretøjskategorier, der bruges i de fem overvågningszoner, antages at svare til landsgennemsnittet mht. køretøjsalder, drivmiddeltype og motorstørrelse. Sammensætningen af bagagevogne afspejler som gennemsnit de bagagevogne der bruges ved flyhandlingen, mht. teknologiniveau, drivmiddel og motorstørrelse (jf. afsnit "Brug af handlingskøretøjer").

Emissionsfaktorer (g/km) er taget fra baggrundsdata den fælles-europæiske COPERT IV model (EMEP/EEA, 2009), der bruges til at beregne den officielle danske emissionsopgørelse for vejtrafik (Winther, 2008). Emissionsfaktorerne er efterfølgende omregnet til g/min til brug for beregningerne af tomgangsemissionen. Til at dække emissionsberegningerne specielt for lave hastigheder og tomgang benyttes emissionsdata for 10 km/t for tunge køretøjer, og 15 km/t for personbiler, der er den nedre grænse for de rejsehastighedsafhængige emissionsfaktorer i COPERT IV. Tomgangsemissionsraterne beregnes som produktet af emissionsfaktorerne (g/km) ved den lave rejsehastighed, og rejsehastigheden.

For dieselpersonbiler, varebiler, lastbiler og busser benyttes en #/kg fuel faktor på 3,1E+15/kg fuel, jf. afsnit 2.3. For en gennemsnitlig personbil er en vægtet faktor på 1,0E+15/kg fuel beregnet ud fra Euro 3 faktorerne i Tabel 2.8. For bagagetraktorer benyttes Tabel 2.8's faktor for Euro 1 benzinbiler på 1,2E+14/kg fuel.

Tabel 2.11. Emissionsfaktorer til brug for emissionsopgørelsen for de fem overvågningszoner

		Personbil-					
	Enhed	diesel	Personbil-DK	Varebil	Lastbil	Bus	Bagagetraktor
Hastighed	km/h	0	0	0	0	0	0
CO	g/min	0,082	0,576	0,534	0,673	0,860	1,537
NO _x	g/min	0,238	0,160	0,309	2,375	3,037	0,188
NO ₂	g/min	0,081	0,025	0,076	0,361	0,461	0,015
HC	g/min	0,013	0,066	0,042	0,213	0,214	0,156
PM	g/min	0,014	0,006	0,025	0,084	0,093	0,010
Fuel	MJ/min	0,818	0,949	1,171	3,496	3,708	0,466
Hastighed	km/h	15	15	15	10	10	
CO	g/km	0,326	2,306	2,136	4,036	5,158	
NO _x	g/km	0,952	0,641	1,236	14,249	18,221	
NO ₂	g/km	0,326	0,100	0,303	2,168	2,768	
HC	g/km	0,051	0,264	0,168	1,281	1,284	
PM	g/km	0,057	0,022	0,098	0,505	0,560	
Fuel	MJ/km	3,270	3,795	4,683	20,978	22,249	
Hastighed	km/h		40	40	40	40	40
CO	g/km		1,140	0,900	1,442	1,571	3,102
NO _x	g/km		0,437	0,813	7,360	7,307	1,201
NO ₂	g/km		0,068	0,200	1,120	1,110	0,106
HC	g/km		0,124	0,110	0,376	0,422	0,378
PM	g/km		0,016	0,065	0,182	0,190	0,068
Fuel	MJ/km		2,393	3,096	11,197	10,049	1,628
PN	#/kg fuel	3,1E+15	1,0E+15	3,1E+15	3,1E+15	3,1E+15	1,2E+14
PN	#/MJ	7,3E+13	2,4E+13	7,3E+13	7,3E+13	7,3E+13	2,8E+12

2.5 Beregningsmetode

Emissioner og brændstofforbrug for den *i*'te celle, på et givent tidspunkt af døgnet, *t*, beregnes for hovedmotorer, APU, motoropstart og handlingsgrej ved at kombinere emissionsraterne fra hhv. udtrykkene 9, 10, 12 og 13 med gitterbaserede koordinater, tidspunkter og tidsrum i de enkelte celler, bestemt ved digitaliseringen af aktivitetsdata for fly og handlingsgrej i afsnit "Digitalisering af aktivitetsdata":

$$\Delta E(t, i) = ER \cdot \Delta t(t, i) \quad (18)$$

ΔE = Emission/brændstofforbrug (g) i den *i*'te celle på tidspunkt = *t*

ER = Emissionsrate/brændstofforbrug (g/s) for hovedmotorer, APU, motoropstart og handlingsgrej

i = Celle i spredningsmodel

Δt = Tidsrum i den *i*'te celle

t = Tidspunkt på døgnet målt i fortløbende sekunder

De beregnede emissioner fra (18) kan bruges til modellering af luftkvaliteten i lufthavnen.

For vejtrafikken beregnes emissioner og brændstofforbrug ved tomgang som:

$$\Delta E(\text{vej})_{\text{tomgang}k} = ER_{\text{tomgang}k} \cdot \Delta T_{\text{tomgang}P,k} \quad (19)$$

ΔE (vej) = Emission/brændstofforbrug (g) ved tomgang

ER = Emissionsrate/brændstofforbrug (g/s) ved tomgang

k = Køretøjstype (Tabel 2.3)

P = Område (kameraplacering, Tabel 2.3)

Ved kørsel på strækningerne angivet i Tabel 2.3 fås emissioner og brændstofforbrug som:

$$\Delta E(\text{vej})_{\text{kørsel},P,k} = EF_{\text{kørsel},P,k} \cdot \Delta L_P \quad (20)$$

ΔE (vej) = Emission/brændstofforbrug (g) ved kørsel

ΔL (vej) = EF = Emissionsfaktor/brændstofforbrug (g/km) ved kørsel

k = Køretøjstype (Tabel 2.3)

P = Område (kameraplacering, Tabel 2.3)

Antallet af partikler for den *i*'te celle, på et givent tidspunkt af døgnet, *t*, findes som produktet af brændstofforbruget, $\Delta E(t,i)$ beregnet i udtrykkene 18 (hovedmotorer, APU, motoropstart og handlingsgrej), 19 (vejtrafik - tomgang) og -20 (vejtrafik - kørsel), og den sammenhørende faktor for antal partikler pr. kg brændstof, EI_n :

$$PN = EI_n \cdot \Delta E(t,i) \quad (21)$$

PN = Antal partikler

EI_n = Antal partikler pr. kg brændstof (#/kg brændstof).

Emissionstotalerne beregnes for timeintervaller over døgnet og kan bruges til den videre beregning af luftkvaliteten i lufthavnen.

3 Resultater

3.1 Totale emissioner og brændstofforbrug for hele lufthavnen

Tabel 3.1 viser resultaterne for brændstofforbrug og emissioner for et døgn i undersøgelsen. For fly og handlingsgrej er værdierne taget som et gennemsnit af resultaterne for de fire døgn, der er indhentet operationsdata for.

Tabel 3.1. Emissioner og brændstofforbrug for hele lufthavnen kildeopdelt for et døgn i undersøgelsen

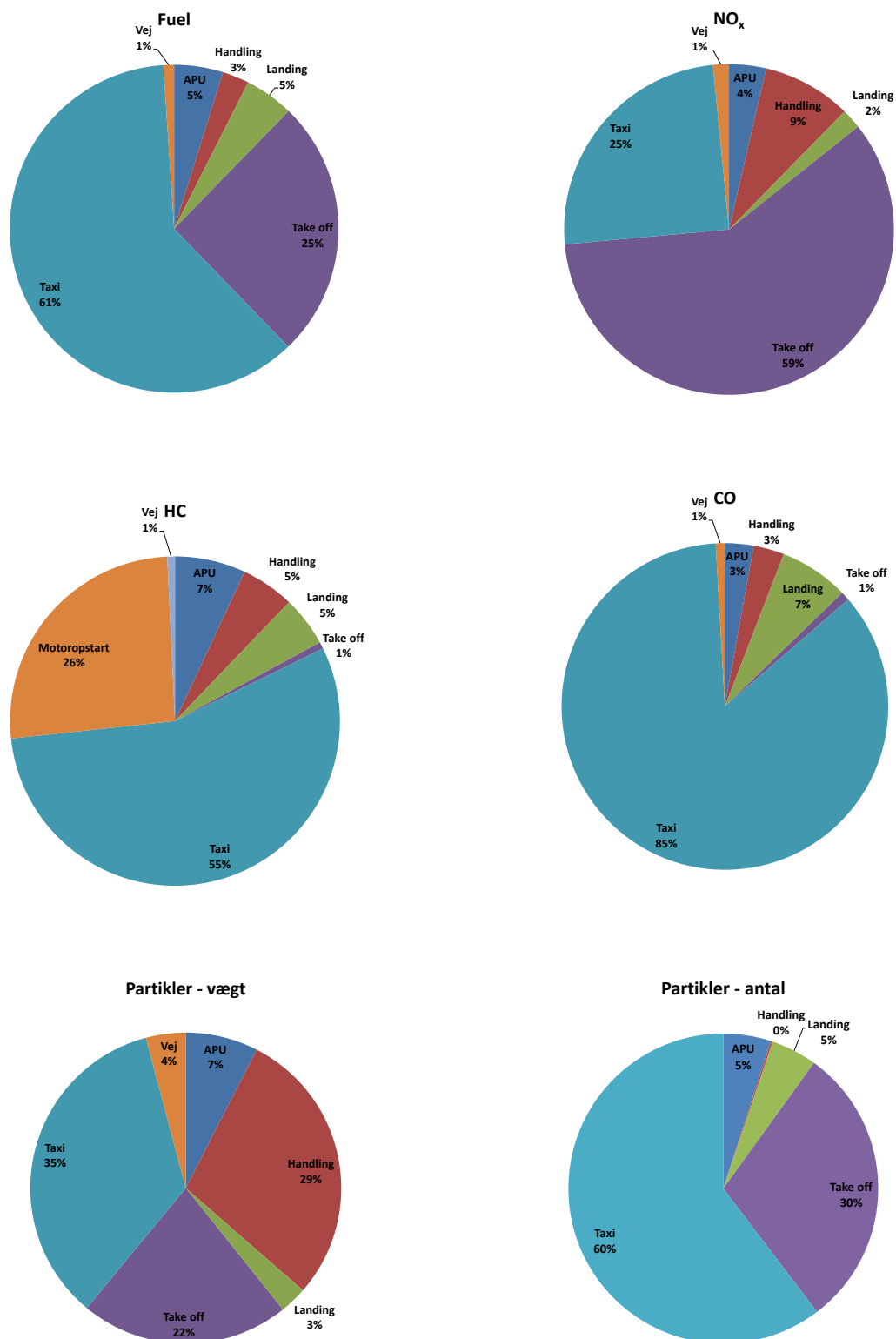
Kilde	Aktivitet	Motordrift	HC kg	CO kg	NO _x Kg	NO ₂ kg	PM kg	PN #	Fuel kg	Fuel GJ
APU	APU ankomst	Normal running	1,8	13,1	22,6	7,7	0,8	1,08E+20	2808	122,1
APU	APU opstart	Start-up	21,8	38,7	6,6	2,3	0,3	5,78E+19	1163	50,6
APU	APU boarding	Normal running	1,3	9,5	16,9	5,8	0,6	7,97E+19	2077	90,4
APU	APU hovedmotorstart	High load	0,2	1,8	4,4	1,5	0,1	1,32E+19	490	21,3
APU	APU ved push back	Normal running	0,3	2,2	4,1	1,4	0,1	1,91E+19	498	21,6
Handling	Handling ankomst	GSE	7,8	29,0	49,3	5,7	3,3	4,64E+18	1496	63,9
Handling	Handling afgang	GSE	10,6	38,4	69,5	7,7	4,4	5,91E+18	1905	81,4
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle	62,1	574,4	108,6	34,2	3,0	9,76E+20	24966	1086,0
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle	56,8	520,8	97,2	30,6	2,7	8,79E+20	22469	977,4
Hovedmotor	Taxi afgang (queuing)	Idle	84,0	794,5	152,7	48,1	4,1	1,38E+21	35177	1530,2
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)	Idle	4,6	43,4	8,5	2,7	0,2	7,57E+19	1935	84,2
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle	4,1	32,4	5,6	1,8	0,2	5,16E+19	1320	57,4
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off	1,9	16,0	706,3	222,5	4,7	1,31E+21	28421	1236,3
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle	9,4	83,3	15,4	4,9	0,4	1,40E+20	3572	155,4
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off	0,5	4,3	186,3	58,7	1,2	3,50E+20	7571	329,3
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle	95,3	71,9	14,2	4,5	0,4	1,26E+20	3210	139,6
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle	1,2	13,7	2,1	0,6	0,0	1,92E+19	492	21,4
Push back	Push back moving	GSE	0,3	1,1	4,6	0,5	0,2	3,99E+17	129	5,5
Push back	Push back ved standplads	GSE	0,5	2,0	8,2	0,9	0,3	7,20E+17	232	9,9
Total			364,5	2290,5	1483,1	442,0	27,2	5,59E+21	139929	6083,9

Brændstofforbrug og emissioner for den kørende trafik beregnet for et døgn i undersøgelsens fem områder er vist i Tabel 3.2. Set i forhold til totalerne fra Tabel 3.1 er emissionsbidragene fra den kørende trafik meget små, og udgør for CO, NO_x, NO₂, HC og PM hhv. 0,9 %, 1,6 %, 1,2 %, 0,8 % og 4,4 %. Antallet af partikler for den kørende trafik er under 0.1 % af totalerne i Tabel 3.1.

Table 3.2. Emissioner for kørende trafik for et enkelt døgn i undersøgelsens fem områder.

	CO	NO_x	NO₂	HC	PM	PN	Energi
	kg	kg	kg	kg	kg	Antal	GJ
Hilton	4,5	9,3	3,0	0,6	0,5	2,23E+18	32,0
Busterminal, T2	3,6	3,3	0,5	0,5	0,1	3,66E+17	7,9
Drop Off T3	1,4	0,5	0,1	0,2	0,0	8,24E+16	2,5
Finger B-C	6,4	3,8	0,6	0,8	0,2	4,11E+17	8,5
Check Øst	5,0	6,7	1,1	0,7	0,3	9,02E+17	13,6
Total	20,9	23,5	5,3	2,8	1,2	3,99E+18	64,5

Figur 3.1 viser procentfordelingen af totale emissioner og brændstofforbrug for hovedmotorer, APU, handlingsgrej og vejgående trafik for et gennemsnitligt døgn i undersøgelsen.

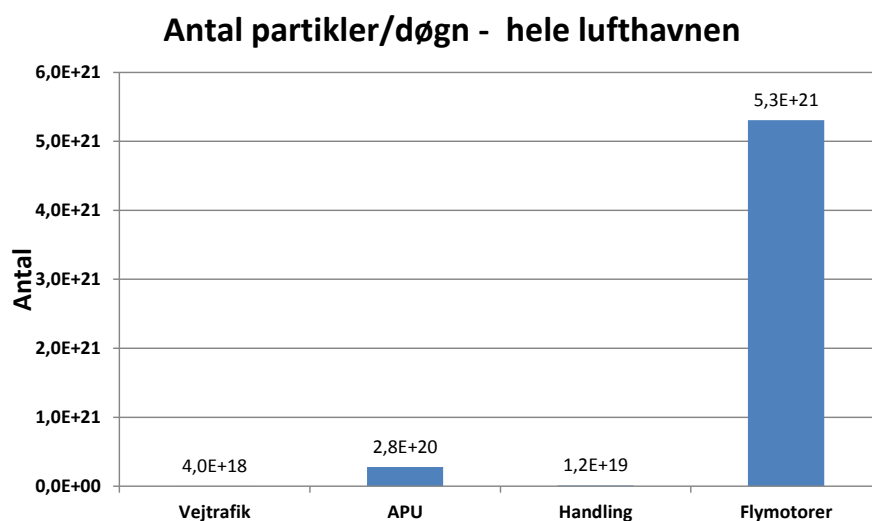


Figur 3.1. Procentfordeling af totale emissioner, partikelantal og brændstofforbrug i hele lufthavnen for hovedmotorer, APU, handlingsgrej og vejtrafik for et gennemsnitligt døgn i undersøgelsen

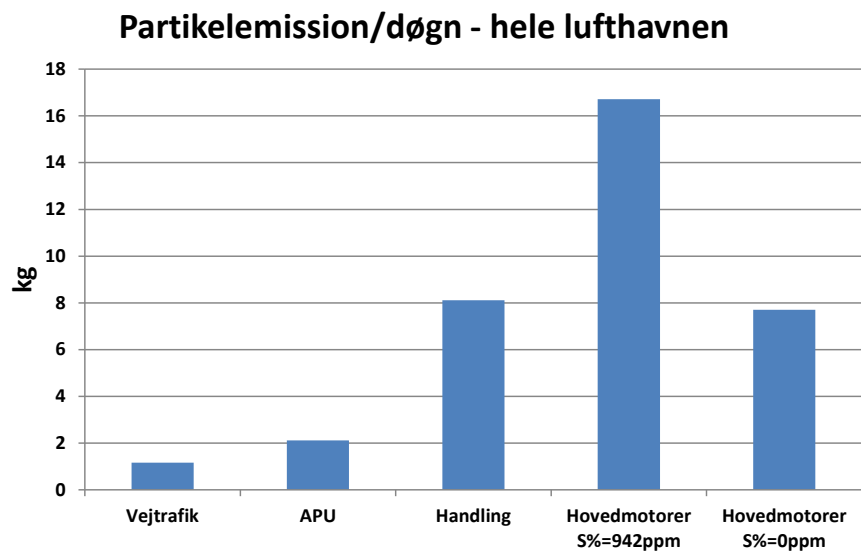
De beregnede emissionsniveauer kan generelt forklares ud fra størrelsen af de brændstofrelaterede emissionsfaktorer vist i Tabel 2.10 og de beregnede energiforbrug vist i Tabel 3.1. Den store emission af HC og CO fra hovedmotorerne udledes specielt ved lav motorbelastning under taxifart, hvor forbrændingen er mindre god, og ved motoropstart (HC), hvor en stor mængde uforbrændt flybrændstof udledes direkte. Angivet per vægt er partikelemissionerne fra handlingsgrej (inklusive push back traktorer) store set i forhold til deres samlede energiforbrug, og emissionsniveauerne afspejler de generelt høje emissionsfaktorer for dieselmaskiner, der bruges i handlingsituationerne. Ved take off bliver NO_x-emissionerne fra hovedmotorer særligt store pga. motorens høje forbrændingstemperatur.

Opgjort som antal partikler er hovedmotorer langt den største kilde. Det største delbidrag beregnes for taxifart, efterfulgt af take off og landing. APU andelen af det samlede partikelantal svarer til APU andelen af det samlede energiforbrug. Pga. de meget lave #/kg fuel faktorer er emissionsbidraget for handlingsgrej tæt ved 0 %. Emissionsbidraget fra vejtrafik bliver endnu lavere end for handlingsgrej, da emissionsfaktorerne for de to emissionskilder er meget ens (Tabel 2.10-11), og energiforbruget for vejtrafik (Tabel 3.2) kun er omtrent en tredjedel af handlingsgrejets energiforbrug (Tabel 3.1). De absolutte beregnede værdier for partikelantal er også vist i Figur 3.2.

Figur 3.3 viser partikelemissionen (vægt) pr. døgn i hele lufthavnen for de tre hovedkilder og den kørende trafik. Det gennemsnitlige svovlindhold i flybrændstoffet er 942 ppm, ifølge fueldeklarationer fra lufthavnens brændstoflager, og denne værdi er brugt ved beregning af jetmotorernes partikel emissionsfaktorer, hvor de sulfatbundne partikler udgør en stor andel. Afledt af dette forventes emissionen af partikler fra hovedmotorer i hele lufthavnen at falde med over 50 %, hvis al svovl fjernes fra flybrændstoffet. I den forbindelse skal det nævnes, at der sandsynligvis også er væsentlige emissionsbesparelser at hente for APU med brug af flybrændstof med lavt svovlindhold. Som en sidebemærkning viser Figur 3.3, at emissionsbidraget fra den kørende trafik i de fem undersøgte områder er meget lille.

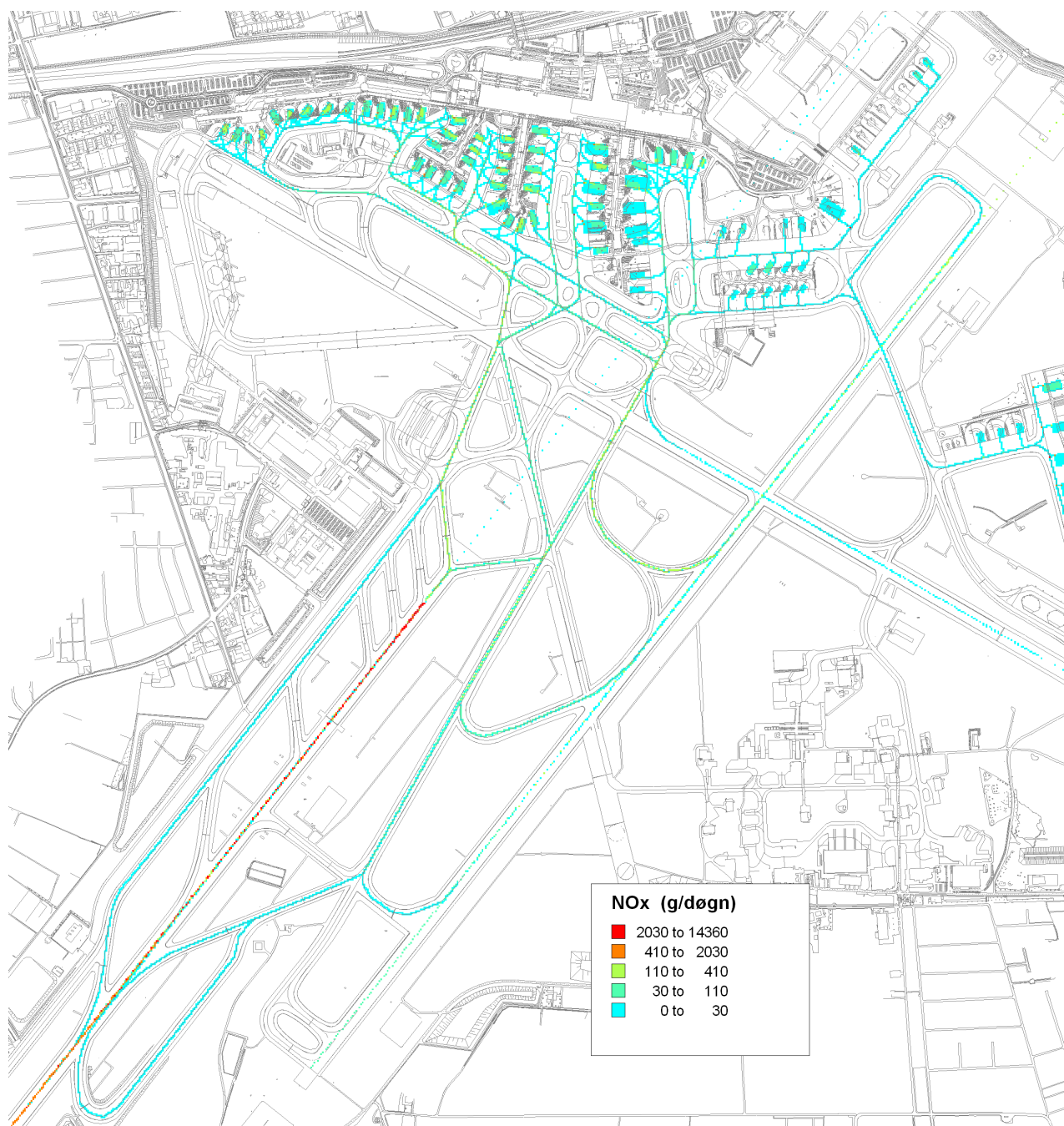


Figur 3.2. Antal partikler for et døgn i Københavns Lufthavn fordelt på hovedkilder

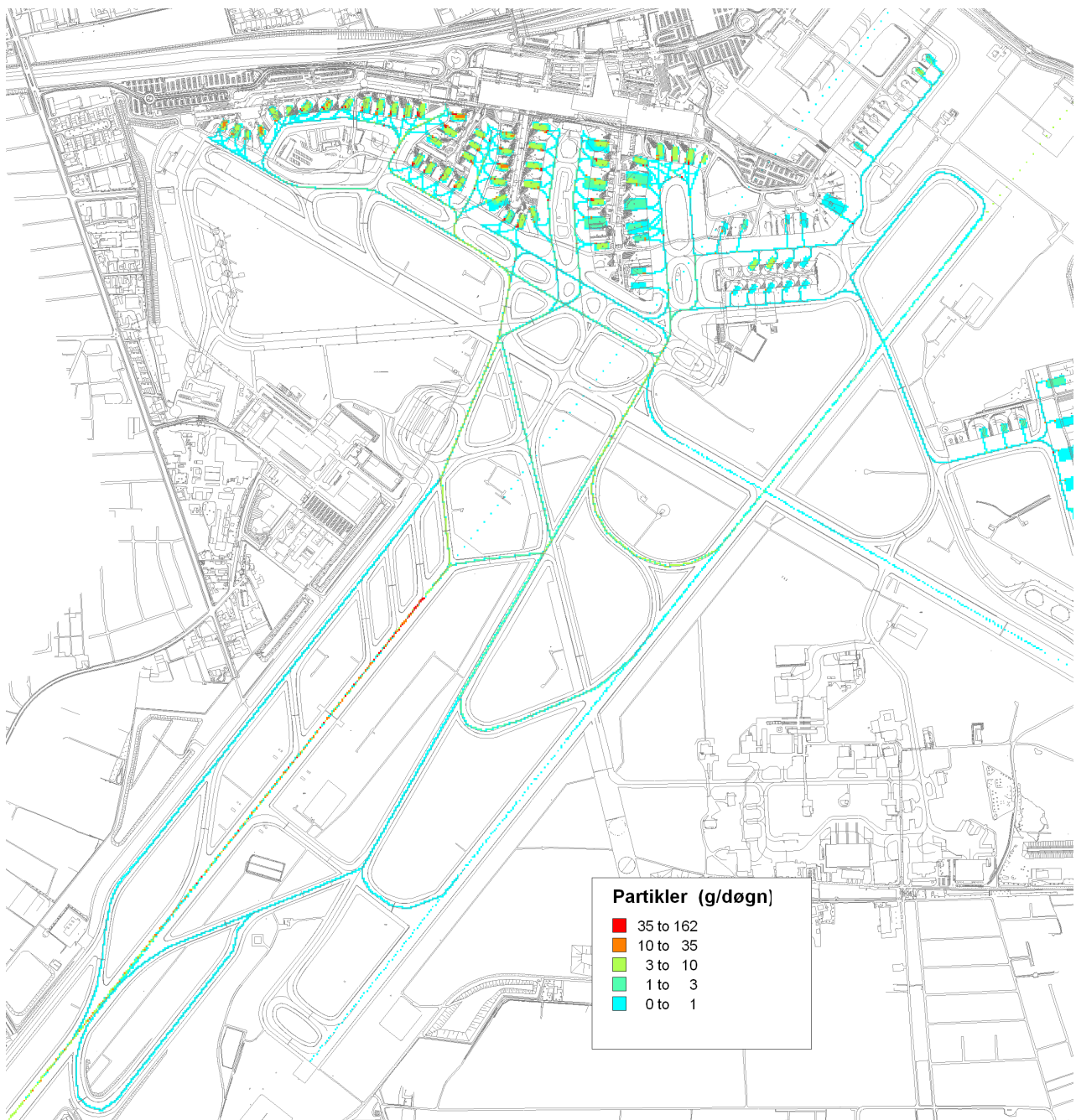


Figur 3.3. Partikelemission i kg for et døgn i Københavns Lufthavn fordelt på hovedkilder

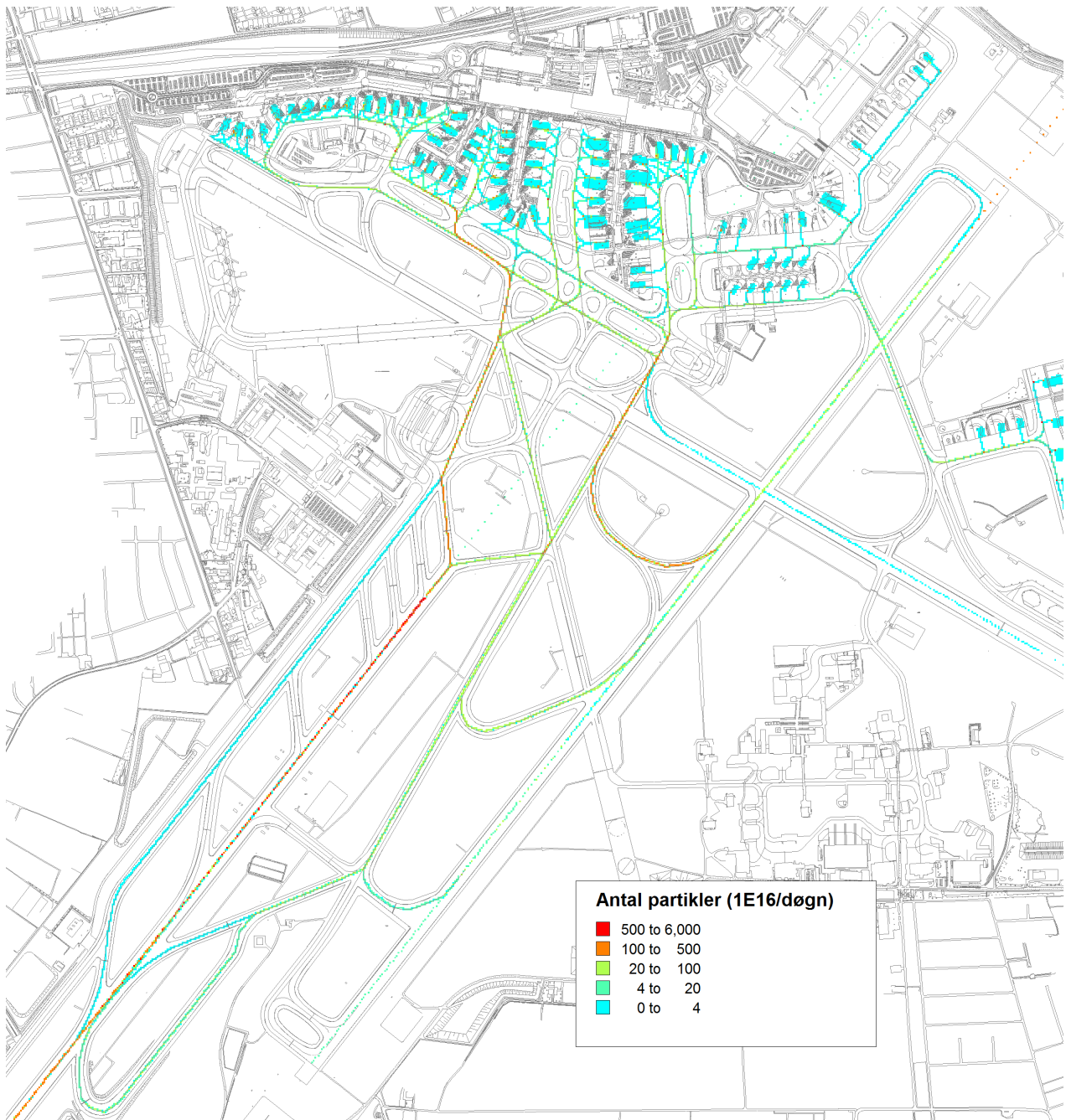
Figur 3.4-3.8 viser den geografiske emissionsfordeling for hhv. NO_x , partikler (vægt og antal), HC og CO for hele lufthavnen for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



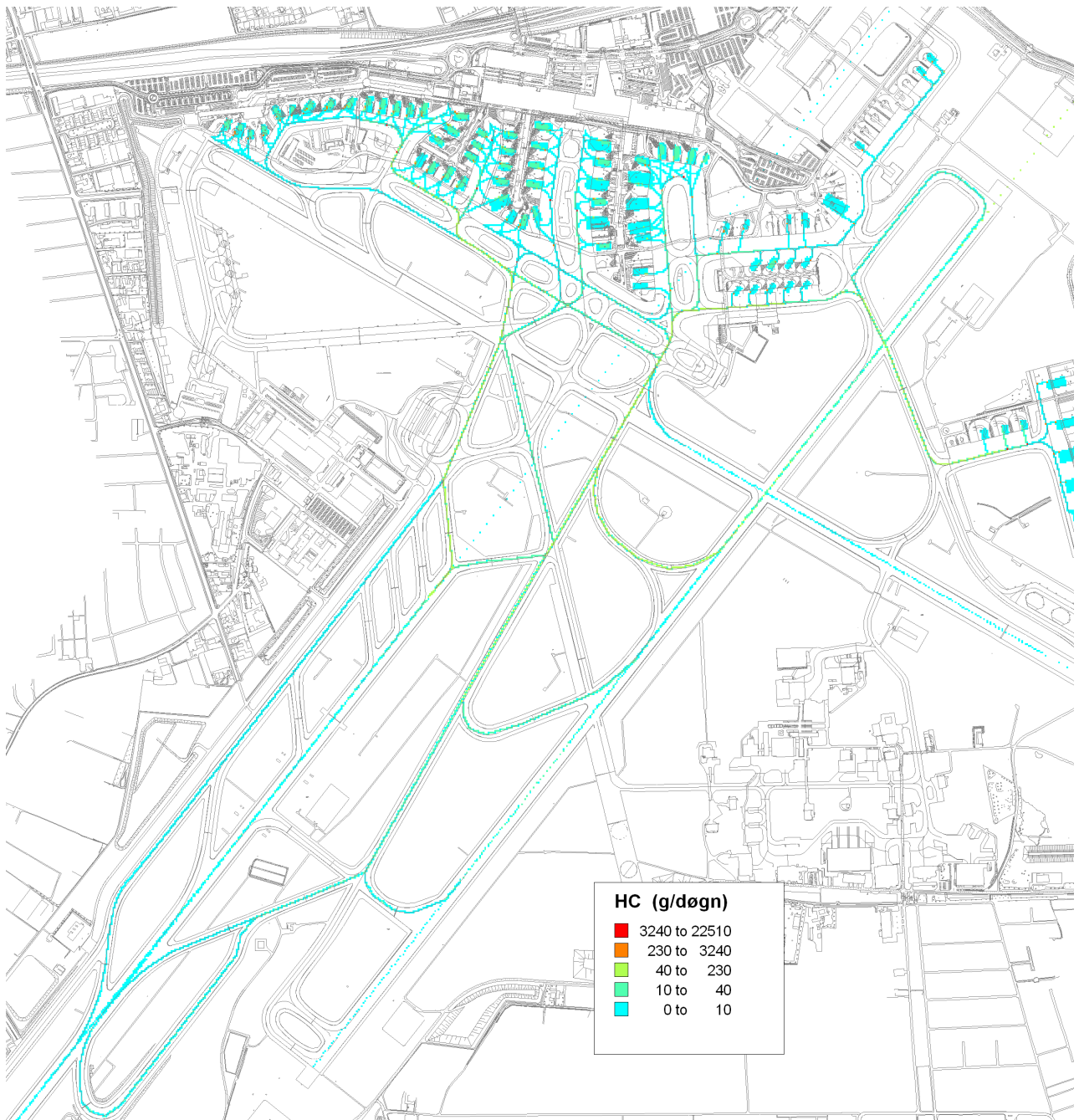
Figur 3.4. Totale emissioner af NO_x for et døgn pr. $5 \times 5 \text{ m}^2$ med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



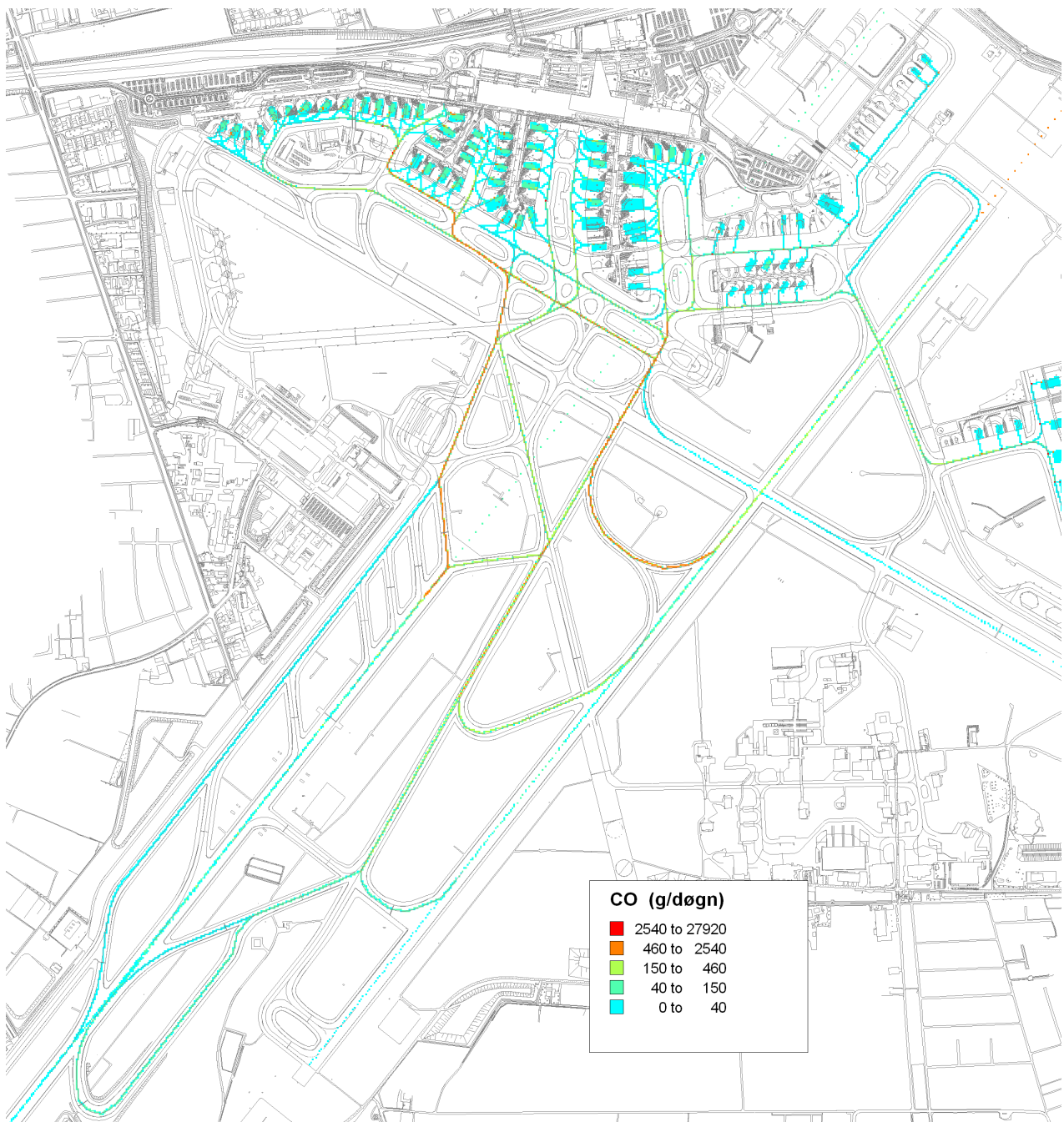
Figur 3.5. Totale partikelemissioner (vægt) for et døgn pr. 5x5 m² med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



Figur 3.6. Totale partikelemissioner (antal) for et døgn pr. 5x5 m² med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



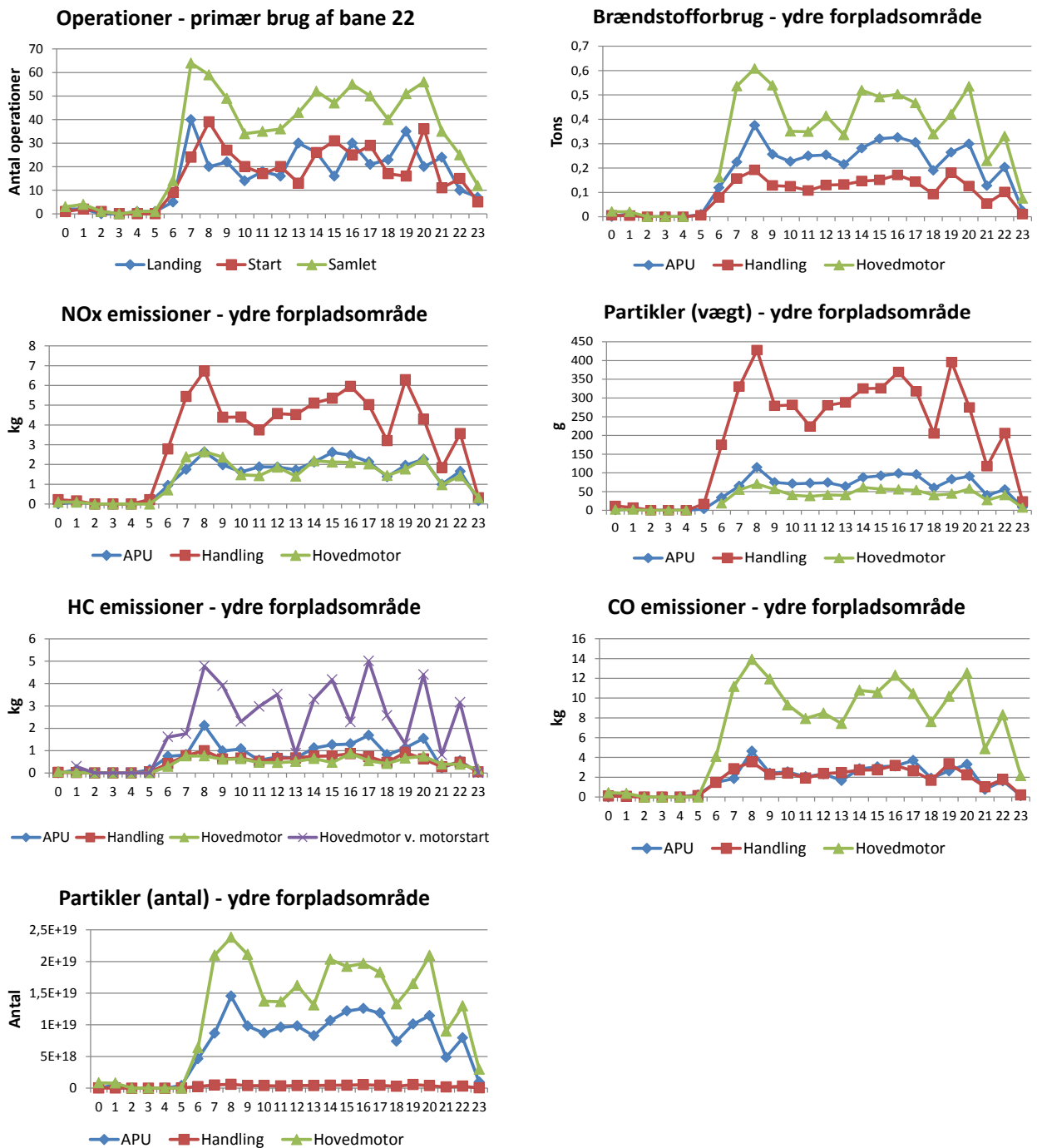
Figur 3.7. Totale emissioner af HC for et døgn pr. 5x5 m² med fortrinsvis anvendelse af bane 22



Figur 3.8. Totale emissioner af CO for et døgn pr. 5x5 m² med fortrinsvis anvendelse af bane 22

3.2 Totale emissioner og brændstofforbrug i forpladsområdet

Figur 3.9 viser timeopdelt brændstofforbrug og timeopdelte emissioner af NO_x, partikel, HC og CO for et udsnit af forpladsområdet; "ydre forpladsområde, svarende til området vist i figurerne 3.10 -3.13 i lufthavnen beregnet for et døgn med primær brug af bane 22. De beregnede resultater kan forklares ud fra trafikudviklingen, der også er vist i Figur 3.9 samlet og fordelt på starter og landinger.



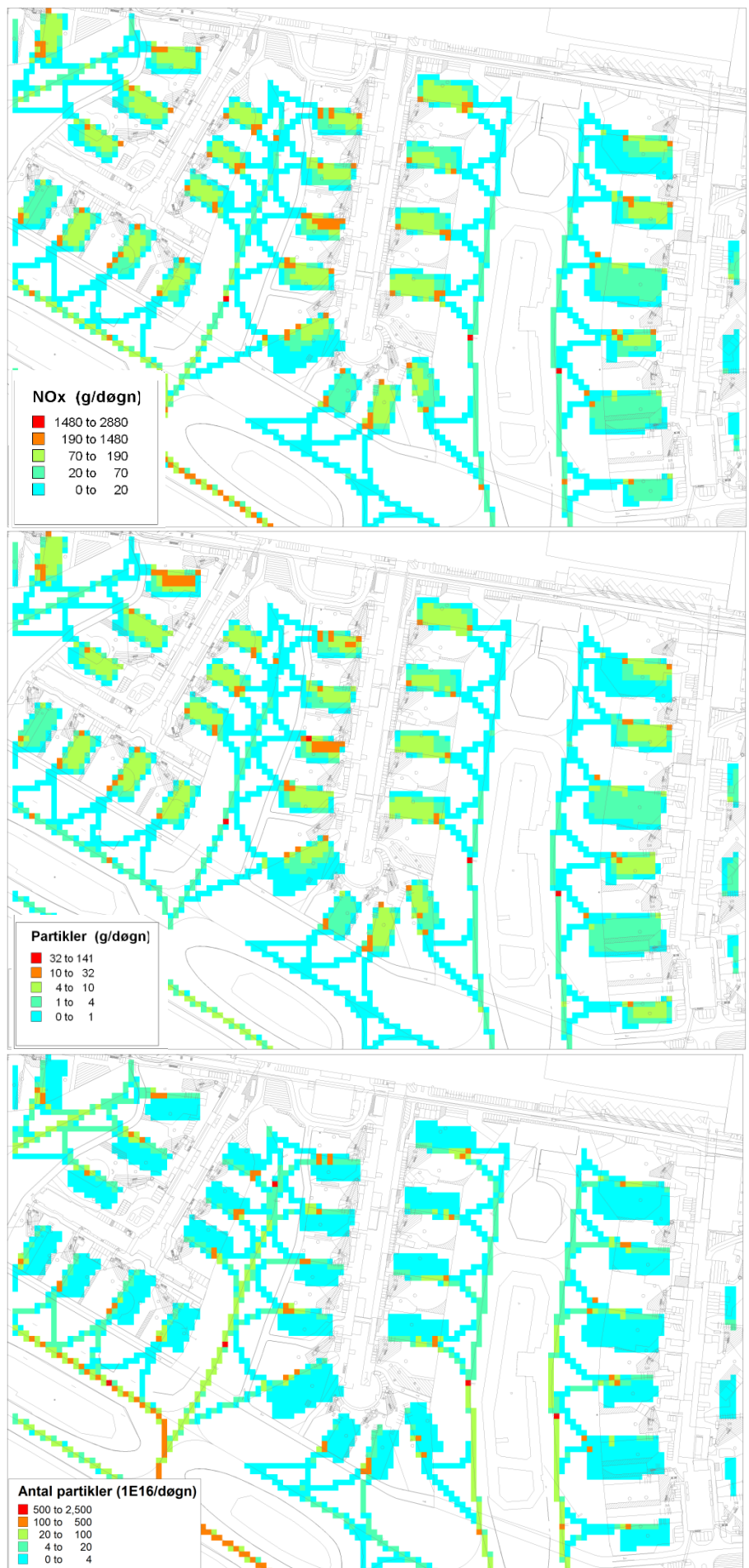
Figur 3.9. Timefordelte emissioner og brændstofforbrug i "ydre forpladsområde" for hovedmotorer, APU og handlingsgrej for et døgn med primær brug af bane 22.

Handlingskøretøjer er klart den største kilde til partikelemissionen på massebasis. Emissionerne fra APU er betragteligt lavere end emissionerne fra handlingskøretøjer, men dog højere end emissionerne fra hovedmotorer. Emissionernes størrelse skyldes, at emissionsfaktorerne for handlingskøretøjer og APU er hhv. 20 og 2-3 gange større end hovedmotorernes emissionsfaktorer, hvilket langt overvejer det noget lavere energiforbrug for disse to kilder sammenlignet med hovedmotorer. Hovedmotorer og APU er langt de største kilder til antallet af udledte partikler, og emissionerne følger udviklingen i brændstofforbruget for de to motortyper. Handlingskøretøjernes andel af det samlede partikelantal er lille, pga. de generelt meget lave #/kg fuel faktorer for dieselmotorer set i forhold til flymotorer.

For NO_x giver handlingskøretøjer klart det største emissionsbidrag, efterfulgt af hovedmotorer og APU, der har nogenlunde lige store NO_x -bidrag. HC-emissionerne for start af hovedmotorer er markant større end HC-emissionerne for flyenes taxifart i forpladsområdet. I travle timer med mange starter, f.eks. timerne 8, 15, 17 og 20, beregnes store HC-emissioner for motorstart.

Figur 3.10 viser emissionen af partikler og NO_x pr. døgn for et udsnit af forpladsområdet i lufthavnen. Det skal understreges at emissionskalaen på figuren ikke er lineær. Der ses tydelige emissionsbidrag fra handlingen på højre side af flyet, samt push-back traktoren og APU før off-block (røde mærker hhv. inderst og yderst). Emissionsspor for push-back og APU er også tydelige, når flyene ruller frem til opstartsmærke. Her er bidrag fra APU og hovedmotor tydelige. Hovedmotorbidrag er også synlige videre ud i lufthavnen, og når flyene ruller ind på standpladsen.

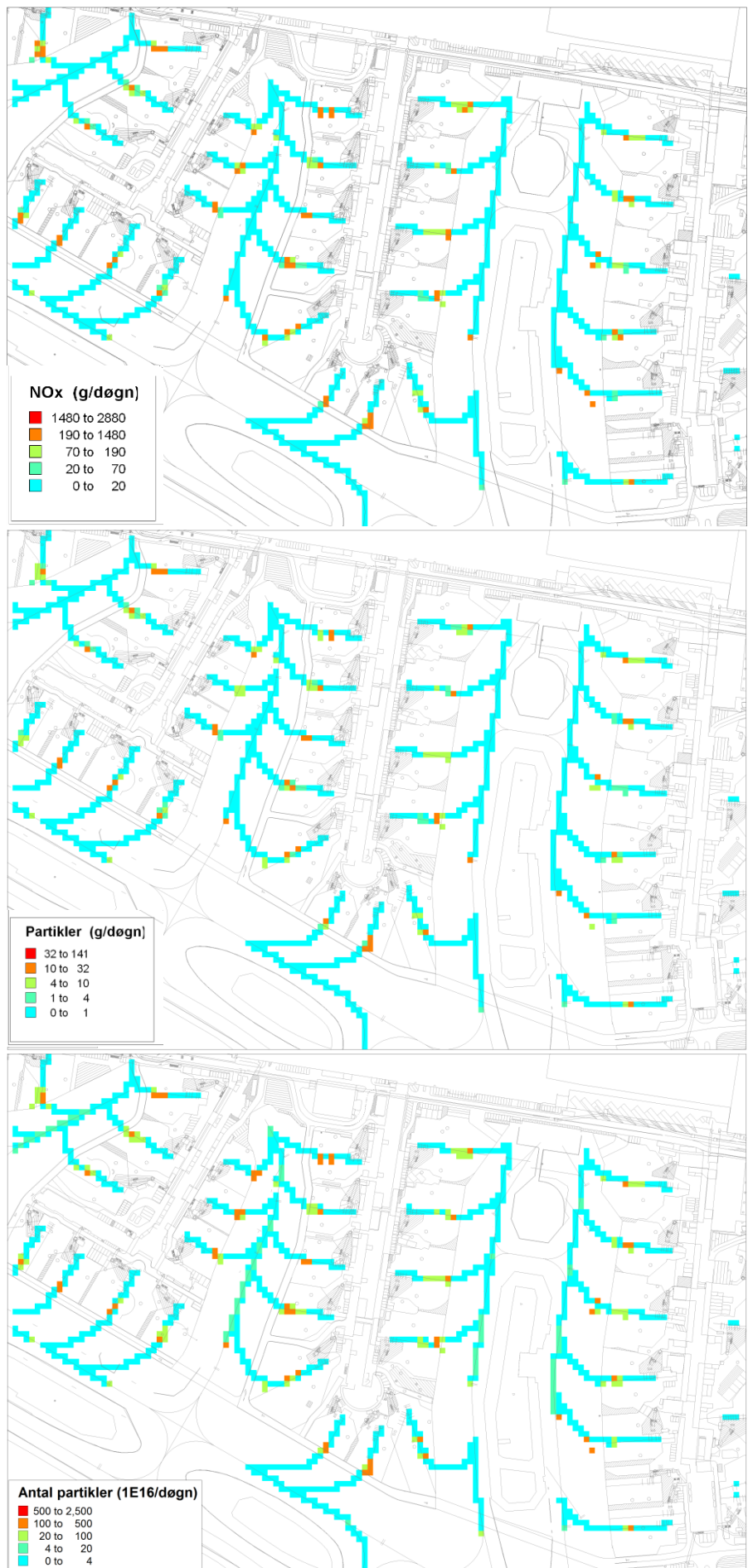
Figurerne 3.11, 3.12 og 3.13 viser særskilt emissionen af partikler og NO_x pr. døgn for hhv. handlingsaktivitet, APU og hovedmotorer for forpladsområdet. Som tilfældet var for Figur 3.10 skal det understreges at emissionskalaerne på figurerne ikke er lineære. På Figurerne 3.12 og 3.13 ses svage emissionsspor for APU og hovedmotorer helt inde ved standpladsens bund, der ikke passer præcist med emissionernes rigtige fysiske placering. Af modeltekniske årsager er det valgt at knytte emissionerne for APU og hovedmotorer til flyets næse, når flyet er i bevægelse. Dette giver en lille usikkerhed på de efterfølgende spredningsberegninger der dog vurderes til at være minimal.



Figur 3.10. Totale emissioner af NO_x og partikler for et døgn pr. 5x5 m² i forpladsområdet.



Figur 3.11. Emissioner af NO_x og partikler for handlingsaktivitet i et døgn pr.5x5 m².



Figur 3.12. Emissioner af NO_x og partikler for APU anvendelse i et døgn pr.5x5 m².



Figur 3.13. Emissioner af NO_x og partikler for hovedmotorer i et døgn pr.5x5 m².

3.3 Totale emissioner og brændstofforbrug i et indre forpladsområde



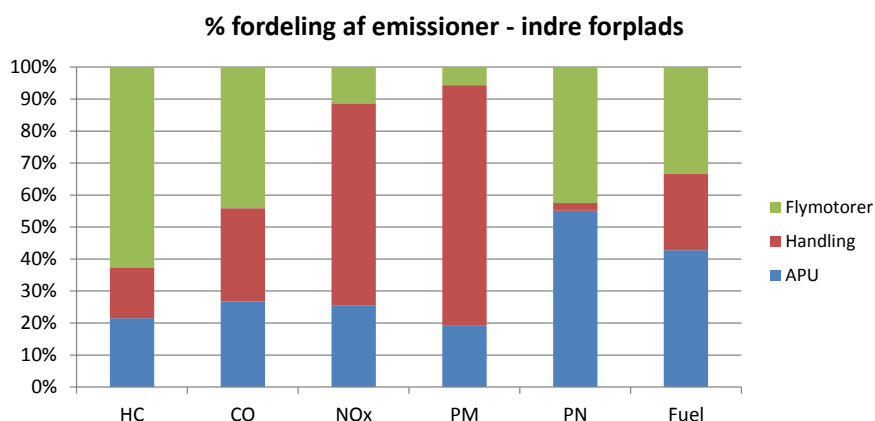
Figur 3.14. Udsnit af forpladsområde kaldet "indre forplads".

På Figur 3.15 vises procentfordelingen af emissioner fra handling, APU og flymotorer fra et mere begrænset område af forpladsen kaldet "indre forplads" (Figur 3.14).

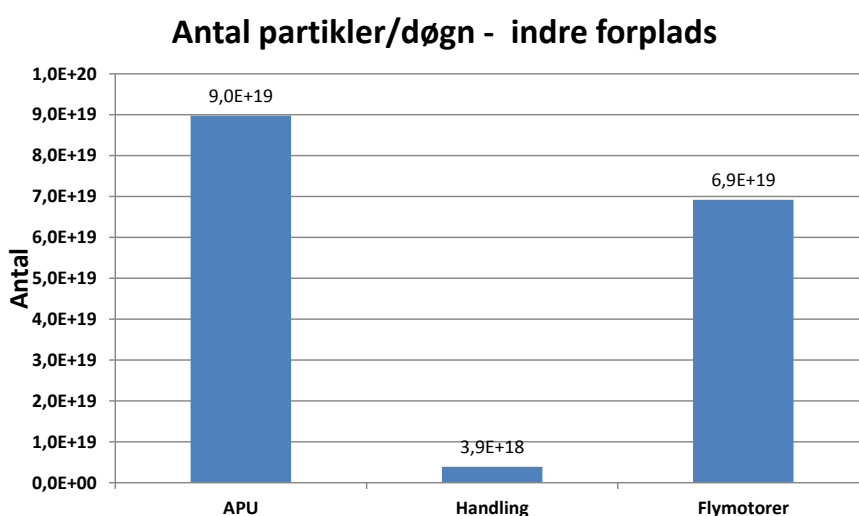
Emissionsandelene fra NO_x og partikler (vægt; benævnt PM på Figur 3.15) er særligt store for handling. Årsagen er de meget store brændstofrelaterede emissionsfaktorer for de dieseldrevne handlingskøretøjer (jf. Tabel 2.10). APU udgør den næststørste andel af de samlede udledninger af NO_x og partikler på forpladsen. De brændstofrelaterede emissionsfaktorer for APU er markant mindre end for de dieseldrevne handlingskøretøjer, men til gengæld er der et væsentligt større samlet brændstofforbrug. For hovedmotorerne er NO_x og især partikelemissionerne lave i forhold til motorenes energiforbrug ved den lave motorbelastning i standpladsområdet, hvilket også fremgår af de brændstofrelaterede emissionsfaktorer vist i Tabel 2.10. Omvendt udleder hovedmotorerne som før nævnt store HC og CO emissioner under taxifart og ved motoropstart.

I modsætning til partikler opgjort efter vægt bliver handlingsgrej en lille kilde til det samlede partikelantal på "det indre forpladsområde" (Figur 3.16), pga. de generelt meget lave $\#/kg$ fuel faktorer for dieselmotorer set i forhold til flymotorer. Emissionsandelen for handlingsgrej beregnes til 2,5 %. Den største emissionsandel beregnes for APU på 54 %, og for hovedmotorer beregnes en lidt mindre emissionsandel på 43 %.

Som nævnt i afsnittet "Emissionsfaktorer" er der en vis usikkerhed på $\#/kg$ fuel faktorerne pga. stor variation i rapporterede data. For hovedmotorer skyldes det de generelt varierende målebetingelser og for APU i særlig grad pga. det lave antal tilgængelige målinger. Derfor kan den relative betydning af de to hovedkilder godt ændre sig noget, når ny emissionsviden foreligger.



Figur 3.15. Procentfordeling af emissioner fra flymotorer, handling og APU på "indre forplads".

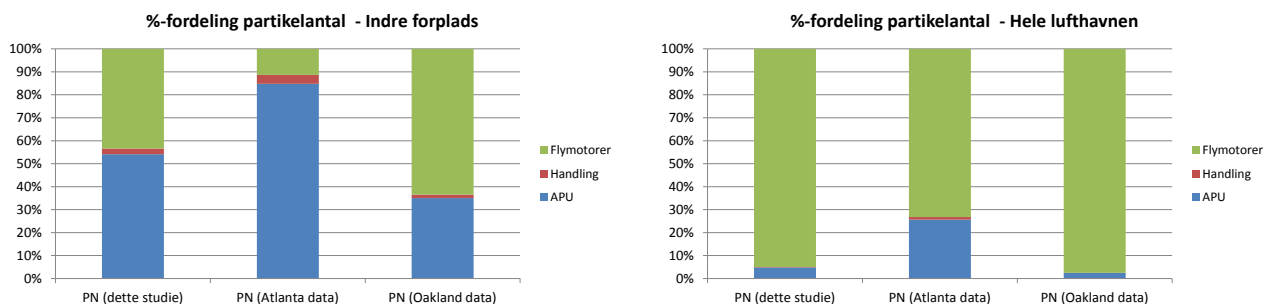


Figur 3.16. Emissioner af antal partikler pr. døgn fra flymotorer, handling og APU på "indre forplads".

3.4 Følsomhedsberegning for hovedmotorers partikelantal

For at belyse, hvordan valget af #/kg fuel faktorer påvirker det samlede resultat for antallet af partikler, er der lavet et følsomhedsstudie, hvor #/kg fuel faktorer for hovedmotorer er taget fra to målestudier udført på jetmotorer i Hartsfield-Jackson Atlanta lufthavnen (Herndon et al., 2008) og i Oakland International Airport (Lobo et al. (2012a). Herndon et al. (2008) måler generelt meget lavere #/kg fuel værdier end Lobo et al. (2012b). I begge studier er #/kg fuel faktorer målt for fly under taxifart og ved take off for de hyppigst anvendte fly i lufthavnen, og på samme tid er motortypen fastslået ud fra flyenes registreringsnummer.

I denne følsomhedsberegning er de målte motorspecifikke emissionfaktorer (#/kg fuel) koblet til de forskellige flyoperationer i Københavns Lufthavn, hvor motortyperne også kendes jf. afsnit 2.3 "Emissionsfaktorer - Hovedmotorer". I tilfælde uden direkte motormatch er en målt motortype tilknyttet primært ud fra en motorstørrelsesbetragtning. For turboprop-motorer, der har en mindre betydning for lufthavnens samlede luftkvalitet, benyttes et vægtet gennemsnit (#/kg fuel) afledt af en første partikelberegning for jetmotorer.



Figur 3.17. Procentfordeling af partikelantal fra flymotorer, handling og APU på "indre forplads" og i hele lufthavnen beregnet som et gennemsnit (dette studie) og med hhv. lave (Atlanta data) og høje (Oakland data) værdier for hovedmotorers #/kg fuel

Når de gennemsnitlige værdier for hovedmotorers #/kg fuel skiftes ud med de lave værdier (Atlanta data) ændres hovedmotorernes emissionsandel fra 43 % til 11 % og APU andelen skifter fra 54 % til 85 % (Figur 3.17). Benyttes de høje værdier (Oakland data) i stedet beregnes hovedmotorandelen til 63 % og APU andelen bliver 35 %. Handlingsbidraget ligger i alle tre tilfælde under 4 %. Opgjort for hele lufthavnen bliver hovedmotorernes emissionsandele på 95 %, 73 % og 98 % for hhv. gennemsnitlige, lave og høje hovedmotor #/kg fuel faktorer. De respektive APU emissionsandele beregnes til hhv. 5 %, 26 % og 2 %, og handlingsbidragene ligger i alle tre tilfælde på 1 % eller derunder.

4 Konklusion

Emissionsopgørelsen for lufthavnen indeholder brændstofforbrug og emissioner fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpemotorer (APU, Auxiliary Power Unit), handlingsgrej og vejgående køretøjer. Opgørelsen har stor geografisk opløsning (opdelt i 5 m x 5 m gitterceller), og for hver gittercelle er aktivitetsopdelte brændstofforbrug og emissioner beregnet med angivelse af tidspunkt for de enkelte udslip.

Aktivitetsdata bygger på antallet af flyoperationer fra lufthavnen samt handlingsselskabernes detaljerede opgørelse af bestanden af handlingsgrej og tidsrum for grejanvendelse. Ud fra internationale databaser er emissionsfaktorer beregnet for hvert enkelt fly, og for handlingsgrejet er emissionsfaktorer fastlagt mht. alder, motorstørrelse, drivmiddel og motorbelastning. Emissionerne for den enkelte aktivitet beregnes ved at kombinere emissionsfaktorer og tidsrum for aktiviteten i den enkelte celle.

De beregnede emissionsniveauer kan generelt forklares ud fra størrelsen af de brændstofrelaterede emissionsfaktorer og de beregnede energiforbrug:

- Handling udgør den største andel af de samlede udledninger af NO_x og partikelmasse på forpladsen. Årsagen er de store brændstofrelaterede emissionsfaktorer for de dieseldrevne handlingskøretøjer.
- APU udgør den næststørste andel af de samlede udledninger af NO_x og partikler på forpladsen. De brændstofrelaterede emissionsfaktorer for APU er markant mindre end for de dieseldrevne handlingskøretøjer, men til gengæld er der et væsentligt større samlet brændstofforbrug.
- For hovedmotorerne er udledningerne af NO_x og især partikelmasse små på forpladsen pga. de meget små brændstofrelaterede emissionsfaktorer ved lav motorbelastning.
- Hovedmotorerne udgør den største andel af udledningerne af HC og CO på forpladsen grundet store emissionsfaktorer under taxifart, hvor motorforbrændingen er dårlig, og ved motoropstart (HC), hvor en stor mængde flybrændstof udledes direkte.
- Hovedmotorerne udgør den største andel af udledningerne for NO_x, partikelmasse, HC og CO når man betragter hele lufthavnen. For HC og CO skyldes emissionerne store emissionsfaktorer og et stort samlet fuelforbrug ved taxifart, samt for HC's vedkommende emissionsbidraget for motoropstart. Ved take off bliver NO_x-emissionerne fra hovedmotorer særligt store pga. motorens høje forbrændingstemperatur.

I modsætning til partikelmasse er handlingsgrej en lille kilde til antal partikler udledt på "det indre forpladsområde", pga. de generelt meget lave emissionsfaktorer (#/kg fuel) for dieselmotorer set i forhold til flymotorer. Emissionsandelen for handlingsgrej beregnes til 2,5 %. Den største emissionsandel beregnes for APU (54 %), efterfulgt af hovedmotorer (43 %).

I hele lufthavnen er hovedmotorer langt den største kilde. APU andelen af det samlede partikelantal svarer til APU andelen af det samlede energiforbrug.

Der er en vis usikkerhed i de beregnede partikelantal for hovedmotorer og APU. Dette skyldes en stor variation i de rapporterede emissionsfaktorer (#/kg fuel), som følge af metodeusikkerhed og de generelt varierende målebetingelser, og for APU i særlig grad pga. det lave antal tilgængelige målinger. Det er metodemæssigt vanskeligt at udføre en kvantitativ bestemmelse af det udledte partikel antal ud fra målinger, da der pga. fysiske og kemiske omdannelser sker en hurtig ændring i partikelantallet, efterhånden som røgfanen afkøles og spredes. Til sammenligning sker der langt mindre ændringer i partikelmassen i forbindelse med spredningen af røgfanen. Andre faktorer der påvirker #/kg fuel faktoren er placeringen af måleapparatur i forhold til de passerende fly, røgfaneudvikling, meteorologiske forhold (vindretning og -hastighed, temperatur, luftfugtighed), svovlindholdet i flybrændstof samt de anvendte måleapparater og deres måleusikkerhed. Derfor kan den relative betydning af de to hovedkilder hovedmotor og APU godt ændre sig, når ny emissionsviden foreligger, mens der ikke forventes større ændringer i konklusionen om, at handlingskøretøjerne kun spiller en meget lille rolle i forbindelse med udledte antal partikler i lufthavnen.

Emissionsopgørelsen viser, at over 50 % af den udledte partikelmasse fra hovedmotorerne stammer fra svovlindholdet i jet fuel, som ifølge oplysninger fra lufthavnens brændstoflager udgør omkring 940 ppm. Forbrændingen af svovl i jet fuel fører til dannelse af sulfatholdige partikler. For APU forventes ligeledes, at en relativt stor andel af den udledte partikelmasse skyldes svovl i jet fuel. Ændringer i svovlindholdet forventes at påvirke udledningerne af partikelantal på omtrent samme måde som partikelmassen.

5 Referencer

ACI Europe, 2012. Ultrafine Particles at Airports - Discussion and assessment of ultrafine particles (UFP) in aviation and at airports in 2012, 54 pp, ACI EUROPE Environmental Strategy Committee, Autumn 2012.

Ban-Weiss, G.A., Lunden, M.M., Kirchstetter, T.W., Harley, R.A., 2010. Size-resolved particle number and volume emission factors for on-road gasoline and diesel motor vehicles. *Aerosol Science* 41, 5 – 12.

EMEP/EEA, 2009: Air Pollutant Emission Inventory Guidebook, prepared by the UNECE/EMEP Task Force on Emissions Inventories and Projections (TFEIP). Available at <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-emission-inventory-guidebook-2009> (02-02-2010).

Geller, M.D., Sardar, S.B., Phuleria, H., Fine, P.M., Sioutas, C. 2005. Measurements of particle number and mass concentrations and size distributions in a tunnel environment. *Environmental Science and Technology*, 39, 8653-8663.

Herndon, S.C., Shorter, J.H., Zahniser, M.S., Nelson, D.D., Jayne, J., Brown, R.C., Miake-Lye, R.C., Waitz, I., Silva, P., Lanni, T., Demerjian, K., Kolb, C.E. (2004): NO and NO₂ Emission Ratios Measured from In-Use Commercial Aircraft during Taxi and Takeoff, *Environ. Sci. Technol.* 2004, 38, 6078-6084.

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.R., Miake-Lye, R.C., 2005. Particulate emissions from in-use commercial aircraft. *Aerosol Science and Technology* 39, 799-809.

Herndon, S.C., Jayne, J.T., Lobo, P., Onasch, T.B., Fleming, G., Hagen, D.E., Whitefield, P.D., Miake-Lye, R.C., 2008. Commercial aircraft engine emissions characterization of in-use aircraft at Hartsfield-Jackson Atlanta International Airport. *Environmental Science & Technology* 42, 1877-1883.

Hu, S., Fruin, S., Kozawa, K., Mara, S., Winer, A.M., Paulson, S.E., 2009. Aircraft emission impacts in a neighborhood adjacent to a general aviation airport in Southern California. *Environmental Science & Technology* 43, 8039-8045.

ICAO (2011): Airport Air Quality Manual (doc. 9889), first edition 2011, ISBN 978-92-9231-862-8 International Civil Aviation Organization.

Janicke, U. (2010): LASPORT Version 2.b Programme Manual, Janicke Consulting, February 2010.

Johnson, G.R., Mazaheri, M., Ristovski, Z.D., Morawska, L., 2008. A plume capture technique for the remote characterization of aircraft engine emissions. *Environmental Science and Technology* 42, 4850-4856.

Kinsey, J.S., Dong, Y., Williams, C., Logan, R. (2009): Evaluation of the Emissions from Low-Sulfur and Biodiesel Fuel Used in a Heavy-Duty Diesel Truck during On-Road Operation - Final Report, Contract No. EC-C-09-027, Work Assignment No. 0-5, EPA Project, U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, August 2009

Kinsey, J.S., Dong, Y., Williams, D.C., 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, 2147e2156.

Lobo, P., Hagen, D.E., Whitefield, P.D., 2012. Measurement and analysis of aircraft engine PM emissions downwind of an active runway at the Oakland International Airport. *Atmospheric Environment* 61, 114-123

Lobo, P., Rye, L., Williams, P.I., Christie, S., Uryga-Bugajska, I., Wilson, C.W., Hagen, D.E., Whitefield, P.D., Blakey, S., Coe, H., Raper, D., Pourkashanian, M., 2012. Impact of Alternative Fuels on Emissions Characteristics of a Gas Turbine Engine – Part 1: Gaseous and Particulate Matter Emissions. *Environmental Science and Technology* 46, 10805–10811.

Mazaheri, M., Johnson, G.R., Morawska, L., 2009. Particle and gaseous emissions from commercial aircraft at each stage of the landing and takeoff cycle. *Environmental Science & Technology* 43, 441e446.

Mazaheri, M., Johnson, G.R., Morawska, L., 2011. An inventory of particle and gaseous emissions from large aircraft thrust engine operations at an airport. *Atmospheric Environment* 45, 3500e3507.

NASA (2006). Aircraft Particle Emissions Experiment (APEX). C.C. Wey, U.S. Army Research Laboratory, Glenn Research Center, Cleveland, Ohio. ARL-TR-3903. 2006-214382, September 2006.

Nielsen, O-K., Winther, M., Mikkelsen, M.H., Hoffmann, L., Nielsen, M., Gyldenkærne, S., Fauser, P., Plejdrup, M.S., Albrektsen, R. & Hjelgaard, K., 2010: Annual Danish Informative Inventory Report to UNECE. Emission inventories from the base year of the protocols to year 2008. National Environmental Research Institute, Aarhus University, Denmark. 565pp. – NERI Technical Report no 776. <http://www.dmu.dk/Pub/FR776.pdf>

Rindlisbacher, T. (2009): Guidance on the Determination of Helicopter Emissions, Edition 1, Reference: 0 / 3/33/33-05-20. FOCA, Bern.

Schäfer, K., Jahn, C., Sturm, P., Lechner, B., Bacher, M. (2003): Aircraft emission measurements by remote sensing methodologies at airports, *Atmospheric Environment* 37 (2003) 5261–5271.

Svane, C., Plovsing, B., Petersen, J. (1997): Københavns Lufthavn Kastrup - Støj fra flytrafik i 1996 (Copenhagen Airport Kastrup – Noise from air traffic in 1996). Delta Akustik, Copenhagen, 87 pp. (in Danish).

Winther, M., Kousgaard, U. & Oxbøl, A. 2006: Calculation of odour emissions from aircraft engines at Copenhagen Airport. - *Science of the Total Environment* (366): 218-232.

Winther, M. 2008: Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until year 2006. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. 219 pp. – NERI Technical Report No. 686. (<http://www.dmu.dk/Pub/FR686.pdf>.)

Zhu, Y., Fanning, E., Yu, R.C., Zhang, Q., Froines, J.R., 2011. Aircraft emissions and local air quality impacts from takeoff activities at a large International Airport. *Atmospheric Environment* 45, 6526-6533.

Bilag 1

Tabel B.1 Flygruppe, APU klasse, antal motorer, motortype og flydimensioner for flyene i Københavns Lufthavn.

Flytype	Flygruppe	Flytype APU	Antal motorer	Motortype	Fly			Dim. kilde
					Længde	Højde	Bredde	
A310-300	D	100-200 new	2	TF	46,7	15,8	43,9	Airbus.com
A319	C	100-200 new	2	TF	33,8	11,8	34,1	Airbus.com
A320-100	C	100-200 new	2	TF	37,6	11,8	34,1	Airbus.com
A321-100	C	100-200 new	2	TF	44,2	11,8	34,1	Airbus.com
A340-300	E	>300 new	4	MTF	63,6	16,7	60,3	Airbus.com
AB330-200	E	200-300	4	TF	58,8	17,4	60,3	Airbus.com
AB330-300	E	200-300	4	MTF	63,6	16,9	60,3	Airbus.com
Airbus A300 B4	D	200-300	2	TF	54,1	16,5	44,8	Airbus.com
Airbus A300-600	D	200-300	2	TF	54,1	16,5	44,8	Airbus.com
Airbus A318	C	100-200 new	2	TF	31,5	12,6	34,1	Airbus.com
Antonov 26	C	Turboprop	0	TP	23,8	8,3	29,2	Wikipedia
ATP	C	Turboprop	0	TP	26	7,6	30,6	Airlines.net
ATR 42-500	C	Turboprop	0	TP	22,7	7,6	24,6	Atr.fr
ATR42 GENERAL	C	Turboprop	0	TP	22,7	7,6	24,6	Atr.fr
ATR72-201	C	Turboprop	0	TP	27,2	7,7	27,1	Atr.fr
BAe (HS) 125-80	B	BJ/RJ	2	TF	14,4	5,3	14,3	Airliners.net
BAe Avro RJ85	C	BJ/RJ	2	TF	28,6	8,6	26,3	Airliners.net
Bae Jetstream 3	B	Turboprop	0	TP	14,4	5,4	15,9	Airliners.net
BAe146-200a	C	BJ/RJ	4	TF	28,6	8,6	26,2	Airliners.net
Beechcraft Beec	B	BJ/RJ	2	TF	20	6	20	Estimated
Boeing 737-300	C	100-200 new	2	TF	32,2	11,1	28,9	Boeing.com
Boeing 737-400	C	100-200 new	2	TF	35,2	11,1	28,9	Boeing.com
Boeing 737-500	C	100-200 new	2	TF	29,8	11,1	28,9	Boeing.com
Boeing 737-600	C	100-200 new	2	TF	31,2	12,6	34,3	Boeing.com
Boeing 737-700	C	100-200 new	2	TF	33,6	12,5	34,3	Boeing.com
Boeing 737-800	C	100-200 new	2	TF	39,5	12,5	34,3	Boeing.com
Boeing 737-900	C	100-200 new	2	TF	42,1	12,5	34,3	Boeing.com
Boeing 747-400	E	>300 new	4	TF	70,6	19,4	64,4	Boeing.com
Boeing 757-200	D	100-200 old	2	MTF	48,5	13,6	38,1	Boeing.com
Boeing 757-200F	D	100-200 old	2	TF	48,5	13,6	38,1	Boeing.com
Boeing 757-300	D	100-200 old	2	MTF	54,4	13,6	38,1	Boeing.com
Boeing 767-200	D	200-300	4	TF	48,5	15,8	47,6	Boeing.com
Boeing 767-300	D	200-300	4	TF	54,9	15,8	47,6	Boeing.com
Boeing 767-400	D	200-300	4	TF	61,3	16,8	51,9	Boeing.com
Boeing 777-200	E	200-300	4	TF	63,7	18,5	60,9	Boeing.com
Bombardier Regi	C	BJ/RJ	2	TF	26,8	6,2	21,2	Airliners.net
Canadair CL100	B	BJ/RJ	2	TF	26,8	6,2	21,2	Airliners.net
canadair cl-601	B	BJ/RJ	2	TF	20,9	6,3	19,6	Airliners.net
Canadair Region	B	BJ/RJ	2	TF	26,8	6,2	21,2	Airliners.net
Cessna 441 Conq	B	Turboprop	0	TP	11,9	4	15	Wikipedia
Cessna 750 Cita	B	BJ/RJ	2	MTF	22	5,8	19,4	Wikipedia
Cessna S560 Cit	B	BJ/RJ	2	TF	14,9	4,6	15,9	Airliners.net
Dassault (Bregu	B	BJ/RJ	2	TF	20	6	20	Estimated
Dassault Falcon	B	BJ/RJ	2	TF	20	6	20	Estimated
De Havilland DH	C	Turboprop	0	TP	32,8	8,4	28,4	Airliners.net
Embraer 145	B	BJ/RJ	2	MTF	29,9	6,8	20	Airliners.net
Embraer 170	C	BJ/RJ	2	TF	29,9	9,7	26	Airliners.net
Embraer E-175	C	BJ/RJ	2	TF	29,9	9,7	26	Airliners.net

Tabel B.1 Flygruppe, APU klasse, antal motorer, motortype og flydimensioner for flyene i Københavns Lufthavn - FORTSAT.

Flytype	Flygruppe	Flytype APU	Antal motorer	Motortype	Fly	Fly	Fly	Dim. kilde
					Længde	Højde	Bredde	
Embraer E-190	C	BJ/RJ	2	TF	36,2	10,3	28,7	Airliners.net
Embraer RJ135	B	BJ/RJ	2	MTF	26,3	6,8	20	Airliners.net
Fairchild Swear	B	Turboprop	0	TP	12,2	4,4	14	Airliners.net
Fokker 100	C	100-200 old	2	MTF	35,5	8,5	28,1	Airliners.net
Fokker 50 (F27)	C	Turboprop	0	TP	25,3	8,3	29	Airliners.net
Fokker 70	C	100-200 old	2	MTF	30,9	8,5	28,1	Airliners.net
GA (Grumman) Gu	B	BJ/RJ	2	MTF	20	6	20	Estimated
INTL AEROSPACE	C	100-200 old	2	TF	20	6	20	Estimated
Learjet 55 Long	B	BJ/RJ	2	TF	16,8	4,5	13,4	Wikipedia
McDonnell Dougl	D	100-200 old	2	TF	41,6	9,1	32,9	Estimated
MD-81 (DC-9-81)	C	100-200 old	2	MTF	41,6	9,1	32,9	Boeing.com
MD-82 (DC-9-82)	C	100-200 old	2	MTF	41,6	9,1	32,9	Boeing.com
MD-83 (DC-9-83)	C	100-200 old	2	MTF	41,6	9,1	32,9	Boeing.com
MD-87 (DC-9-87)	C	100-200 old	2	MTF	36,3	9,3	32,9	Boeing.com
MD88	C	100-200 old	2	MTF	41,6	9,1	32,9	Boeing.com
Saab SF340A	B	Turboprop	0	TP	19,7	7	21,4	Airliners.net

Tabel B.2. Standpladsoplysninger for Københavns Lufthavn.

Standplads	Pushback	Hovedmotor tændt	Tankning	Standplads	Pushback	Hovedmotor tændt	Tankning
	(Y/N)	(Y/N)			(Y/N)	(Y/N)	
A11	Y	N	Dispenser truck	D1	Y	Y	Dispenser truck
A12	Y	Y	Dispenser truck	D2	Y	Y	Dispenser truck
A14	Y	Y	Dispenser truck	D3	Y	Y	Dispenser truck
A15	Y	Y	Dispenser truck	D4	Y	Y	Dispenser truck
A17	Y	Y	Dispenser truck	DIV4	N	Y	Refuelling truck
A18	Y	Y	Dispenser truck	DIV5	N	Y	Refuelling truck
A20	Y	Y	Dispenser truck	DM1	N	Y	Refuelling truck
A21	Y	Y	Dispenser truck	DM3	N	Y	Refuelling truck
A22	Y	Y	Dispenser truck	E60A	N	Y	Dispenser truck
A23	Y	Y	Dispenser truck	E70	N	Y	Dispenser truck
A25	N	Y	Dispenser truck	E72	N	Y	Dispenser truck
A26	N	Y	Dispenser truck	E73	N	Y	Dispenser truck
A27	N	Y	Dispenser truck	E75	N	Y	Dispenser truck
A28	N	Y	Dispenser truck	E76	N	Y	Dispenser truck
A30	N	Y	Dispenser truck	E77	N	Y	Dispenser truck
A31	N	Y	Dispenser truck	E78	N	Y	Dispenser truck
A32	N	Y	Dispenser truck	F82	N	Y	Dispenser truck
A33	N	Y	Dispenser truck	F83	N	Y	Dispenser truck
A34	N	Y	Dispenser truck	F84	N	Y	Dispenser truck
A4	Y	Y	Dispenser truck	F85	N	Y	Dispenser truck
A6	Y	Y	Dispenser truck	F86	N	Y	Dispenser truck
A7	Y	N	Dispenser truck	F90	N	Y	Refuelling truck
A8	Y	Y	Dispenser truck	F91	N	Y	Refuelling truck
A9	Y	N	Dispenser truck	F92	N	Y	Refuelling truck
B10	Y	N	Dispenser truck	F93	N	Y	Refuelling truck
B15	Y	Y	Dispenser truck	F94	N	Y	Refuelling truck
B16	Y	Y	Dispenser truck	F95	N	Y	Refuelling truck
B19	Y	Y	Dispenser truck	F96	N	Y	Refuelling truck

Tabel B.2. Standpladsoplysninger for Københavns Lufthavn - FORTSAT.

Standplads	Pushback (Y/N)	Hovedmotor tændt (Y/N)	Tankning	Standplads	Pushback (Y/N)	Hovedmotor tændt (Y/N)	Tankning
B2	Y	Y	Dispenser truck	F97	N	Y	Refuelling truck
B3	Y	N	Dispenser truck	F98	N	Y	Refuelling truck
B4	Y	N	Dispenser truck	G112	N	Y	Dispenser truck
B5	Y	N	Dispenser truck	G113	N	Y	Dispenser truck
B6	Y	N	Dispenser truck	G114	N	Y	Dispenser truck
B7	Y	N	Dispenser truck	G121	N	Y	Dispenser truck
B8	Y	N	Dispenser truck	G123	N	Y	Dispenser truck
B9	Y	N	Dispenser truck	G124	N	Y	Dispenser truck
C10	Y	N	Dispenser truck	G125	N	Y	Dispenser truck
C23	Y	Y	Dispenser truck	G127	N	Y	Dispenser truck
C26	Y	N	Dispenser truck	G129	N	Y	Dispenser truck
C28	Y	N	Dispenser truck	G130	N	Y	Dispenser truck
C29	Y	Y	Dispenser truck	G133	N	Y	Dispenser truck
C30	Y	N	Dispenser truck	G136	N	Y	Dispenser truck
C32	Y	N	Dispenser truck	G15	N	Y	Dispenser truck
C33	Y	Y	Dispenser truck	G16	N	Y	Dispenser truck
C34	Y	N	Dispenser truck	G17	N	Y	Dispenser truck
C35	Y	Y	Dispenser truck	H100	Y	Y	Dispenser truck
C37	Y	Y	Dispenser truck	H102	Y	Y	Dispenser truck
C38	Y	N	Dispenser truck	H103	Y	Y	Dispenser truck
C39	Y	Y	Dispenser truck	H106	Y	Y	Dispenser truck
C40	Y	Y	Dispenser truck	H107	Y	Y	Dispenser truck
C47	Y	Y	Dispenser truck	MUK1	N	Y	Dispenser truck
C49	Y	Y	Dispenser truck	MUK3	N	Y	Dispenser truck
				SAS3	N	Y	Refuelling truck
				W1	N	Y	Refuelling truck

Tabel B.3. Handlingselskab benyttet af flyoperatørerne i Københavns Lufthavn.

Operatør	Handler Model	Handler Original	Operatør	Handler Model	Handler Original
			JET AVIATION BUSINESS JETS		
ABC Air Hungary (ACT airlines)	SGS	Gods	AG	SGS	SGS
ACD/AD HOC	SGS	Gods	Jet Time	Novia	Novia
ADRIA AIRWAYS	SGS	SGS	JetAir Ltd.	SGS	SGS
Aeroflot Russian Airlines	SGS	SGS	KLM ROYAL DUTCH AIRLINES	Novia	Novia
AIR ALSIE	SGS	SGS	Korean Air	SGS	Gods
AIR BALTIC	Novia	Novia	LOT POLSKIE LINIE LOTNICZE	SGS	SGS
AIR BERLIN	Novia	Novia	LUFTHANSA	SGS	SGS
Air China International	SGS	Gods	MALEV Hungarian Airlines	Novia	Novia
AIR FRANCE	Novia	Novia	Malmoe Aviation AB	SGS	SGS
AIR GREENLAND	Novia	Novia	Net Jets Europe Ltd.	SGS	SGS
AIRFIX AVIATION	SGS	Gods	NEXT JET	SGS	SGS
Airline Support Executive	SGS	Gods	North Flying / Aalborg	SGS	SGS
Amsterdam Airlines	SGS	SGS	Norwegian Air Shuttle	Novia	Novia
ASTRAEUS LTD.	SGS	SGS	Novia Handling	SGS	Gods
Atlantic Airways	SGS	SGS	OLT Ostfriesische Lufttransport	SGS	SGS
AUSTRIAN AIRLINES	SGS	SGS	ONUR AIR	Novia	Novia
BH Airlines	SGS	SGS	Pegasus	SGS	SGS
Blue 1	SGS	SGS	Primera Air Scandinavia	Novia	Novia
BRITISH AIRWAYS	Novia	Novia	RAF-AVIA	SGS	Gods
BRITISH MIDLAND	SGS	SGS	SCANDINAVIAN AIRLINES	SGS	SGS
Brussels Airlines	Novia	Novia	Singapore Airlines	SGS	SGS
China Cargo Airlines	SGS	Gods	Skyeurope Airlines	SGS	SGS
CIMBER STERLING	SGS	SGS	SKYWAYS AB	SGS	SGS
Continental Airlines	Novia	Novia	SPANAIR	SGS	SGS
CROATIA AIRLINES	Novia	Novia	STAR AIR A/S	SGS	SGS
CSA Czechoslovak Airlines	Novia	Novia	Swiss International Airlines	Novia	Novia
DANISH AIR TRANSPORT	SGS	SGS	SYRIAN ARAB AIRLINES	Novia	Novia
DELTA AIR LINES Inc.	Novia	Novia	TAP AIR PORTUGAL	SGS	SGS
Easyjet	Novia	Novia	THAI AIRWAYS INTERNATIONAL	SGS	SGS
ESTONIAN AIR	SGS	SGS	Thomas Cook Airlines Scandinav	SGS	SGS
European Air Transport	SGS	Gods	Transavia	Novia	Novia
Exin Co. Ltd.	SGS	Gods	Transavia Denmark	Novia	Novia
Federal Express	SGS	Gods	TUIfly Nordic	SGS	SGS
FINNAIR	Novia	Novia	TURKISH AIRLINES	Novia	Novia
HURKUS HAVAYOULU (FREE BIRD)					
AI	SGS	SGS	Universal Weather and Aviation	SGS	SGS
IBERIA	Novia	Novia	Viking Airlines AB	SGS	SGS
ICELANDAIR	SGS	SGS	VistaJet	SGS	Gods
IRAN AIR	SGS	SGS	WIDEROE NORSKAIR	SGS	SGS
JAT YUGOSLAV AIRLINES	SGS	SGS	Wings of Bornholm	SGS	SGS

Tabel B.4. Emissionsfaktorer og brændstofforbrug for APU.

Flytype APU	Op_type	APU Mode	EI NO _x kg/h	EI NO ₂ kg/h	EI CO kg/h	EI HC kg/h	EI PM kg/h	Fuel kg/h
>300 new	11	Start-up	1,21	0,414	1,486	0,180	0,031	235
>300 new	12	Normal running	2,892	0,989	0,149	0,078	0,023	170
>300 new	5	Normal running	2,892	0,989	0,149	0,078	0,031	235
>300 new	18	Normal running	2,892	0,989	0,149	0,078	0,042	315
>300 new	13	High load	4,048	1,384	0,192	0,076	0,031	235
>300 old	11	Start-up	1,137	0,389	5,400	0,302	0,040	300
>300 old	12	Normal running	2,071	0,708	3,695	0,153	0,027	205
>300 old	5	Normal running	2,071	0,708	3,695	0,153	0,040	300
>300 old	18	Normal running	2,071	0,708	3,695	0,153	0,046	345
>300 old	13	High load	2,645	0,905	2,555	0,125	0,040	300
100-200 new	18	Normal running	0,805	0,275	0,419	0,094	0,031	100
100-200 new	5	Normal running	0,805	0,275	0,419	0,094	0,023	75
100-200 new	11	Start-up	0,364	0,124	3,734	2,662	0,031	100
100-200 new	12	Normal running	0,805	0,275	0,419	0,094	0,039	125
100-200 new	13	High load	1,016	0,347	0,495	0,091	0,031	100
100-200 old	12	Normal running	1,064	0,364	0,336	0,036	0,034	110
100-200 old	5	Normal running	1,064	0,364	0,336	0,036	0,025	80
100-200 old	11	Start-up	0,565	0,193	1,289	0,105	0,034	110
100-200 old	18	Normal running	1,064	0,364	0,336	0,036	0,044	140
100-200 old	13	High load	1,354	0,463	0,453	0,036	0,034	110
200-300	12	Normal running	1,756	0,601	0,248	0,070	0,056	180
200-300	11	Start-up	0,798	0,273	0,982	0,243	0,033	105
200-300	13	High load	2,091	0,715	0,239	0,059	0,056	180
200-300	18	Normal running	1,756	0,601	0,248	0,070	0,063	200
200-300	5	Normal running	1,756	0,601	0,248	0,070	0,056	180
BJ/RJ	5	Normal running	0,452	0,155	0,799	0,044	0,028	90
BJ/RJ	11	Start-up	0,274	0,094	1,019	0,107	0,016	50
BJ/RJ	12	Normal running	0,452	0,155	0,799	0,044	0,028	90
BJ/RJ	13	High load	0,53	0,181	0,805	0,042	0,033	105
BJ/RJ	18	Normal running	0,452	0,155	0,799	0,044	0,028	90
Turboprop	18	Normal running	0	0	0	0	0	0
Turboprop	5	Normal running	0	0	0	0	0	0
Turboprop	11	Start-up	0	0	0	0	0	0
Turboprop	12	Normal running	0	0	0	0	0	0
Turboprop	13	High load	0	0	0	0	0	0

Table B.5. Emissionsfaktorer og brændstofforbrug for handlingskøretøjer.

Fuel type	Direktiv	St. kode	Effektint.	Emissions-trin	Årsint.		NO _x g/kWh	NO ₂ g/kWh	VOC g/kWh	CO g/kWh	TSP g/kWh	Fuel g/kWh	Fuel MJ/kWh
					Startår	Slutår							
Diesel	NRMM	A	P<19	<1981	0	1980	12,000	1,320	5,000	7,000	2,800	300	12,8
Diesel	NRMM	A	P<19	1981-1990	1981	1990	11,500	1,265	3,800	6,000	2,300	285	12,2
Diesel	NRMM	A	P<19	1991-Stage I	1991	9999	11,200	1,232	2,500	5,000	1,600	270	11,5
Diesel	NRMM	A	P<19	Stage I			11,200	1,232	2,500	5,000	1,600	270	11,5
Diesel	NRMM	A	P<19	Stage II			11,200	1,232	2,500	5,000	1,600	270	11,5
Diesel	NRMM	A	P<19	Stage IIIA			11,200	1,232	2,500	5,000	1,600	270	11,5
Diesel	NRMM	A	P<19	Stage IIIB			11,200	1,232	2,500	5,000	1,600	270	11,5
Diesel	NRMM	A	P<19	Stage IV			11,200	1,232	2,500	5,000	1,600	270	11,5
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	<1981	0	1980	18,000	1,980	2,500	6,500	2,000	300	12,8
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	1981-1990	1981	1990	18,000	1,980	2,200	5,500	1,400	281	12,0
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	1991-Stage I	1991	2000	9,800	1,078	1,800	4,500	1,400	262	11,2
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	Stage I			9,800	1,078	1,800	4,500	1,400	262	11,2
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	Stage II	2001	2006	6,500	0,715	0,600	2,200	0,400	262	11,2
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	Stage IIIA	2007	9999	6,180	0,927	0,570	2,200	0,400	262	11,2
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	Stage IIIB			6,180	0,927	0,570	2,200	0,400	262	11,2
Diesel	NRMM	B	19<=P<37	Stage IV			6,180	0,927	0,570	2,200	0,400	262	11,2
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	<1981	0	1980	7,700	0,847	2,400	6,000	1,800	290	12,4
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	1981-1990	1981	1990	8,600	0,946	2,000	5,300	1,200	275	11,7
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	1991-Stage I	1991	1998	11,500	1,265	1,500	4,500	0,800	260	11,1
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	Stage I	1999	2003	7,700	0,847	0,600	2,200	0,400	260	11,1
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	Stage II	2004	2007	5,500	0,605	0,400	2,200	0,200	260	11,1
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	Stage IIIA	2008	2012	3,943	0,591	0,290	2,200	0,200	260	11,1
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	Stage IIIB	2013	9999	3,943	0,591	0,290	2,200	0,023	260	11,1
Diesel	NRMM	C	37<=P<56	Stage IV			3,943	0,591	0,290	2,200	0,023	260	11,1
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	<1981	0	1980	7,700	0,847	2,000	5,000	1,400	290	12,4
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	1981-1990	1981	1990	8,600	0,946	1,600	4,300	1,000	275	11,7
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	1991-Stage I	1991	1998	11,500	1,265	1,200	3,500	0,400	260	11,1
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	Stage I	1999	2003	7,700	0,847	0,400	1,500	0,200	260	11,1
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	Stage II	2004	2007	5,500	0,605	0,300	1,500	0,200	260	11,1
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	Stage IIIA	2008	2011	4,011	0,602	0,220	1,500	0,200	260	11,1
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	Stage IIIB	2012	2014	2,970	0,446	0,171	1,500	0,023	260	11,1
Diesel	NRMM	D	56<=P<75	Stage IV	2015	9999	0,360	0,054	0,171	1,500	0,023	260	11,1
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	<1981	0	1980	10,500	1,155	2,000	5,000	1,400	280	12,0
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	1981-1990	1981	1990	11,800	1,298	1,600	4,300	1,000	268	11,4
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	1991-Stage I	1991	1998	13,300	1,463	1,200	3,500	0,400	255	10,9
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	Stage I	1999	2002	8,100	0,891	0,400	1,500	0,200	255	10,9
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	Stage II	2003	2006	5,200	0,572	0,300	1,500	0,200	255	10,9
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	Stage IIIA	2007	2011	3,404	0,511	0,200	1,500	0,200	255	10,9
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	Stage IIIB	2012	2014	2,970	0,446	0,171	1,500	0,023	255	10,9
Diesel	NRMM	E	75<=P<130	Stage IV	2015	9999	0,360	0,054	0,171	1,500	0,023	255	10,9
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	<1981	0	1980	17,800	1,958	1,500	2,500	0,900	270	11,5
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	1981-1990	1981	1990	12,400	1,364	1,000	2,500	0,800	260	11,1
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	1991-Stage I	1991	2001	11,200	1,232	0,500	2,500	0,400	250	10,7
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	Stage I			7,600	0,836	0,300	1,500	0,200	250	10,7
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	Stage II	2002	2005	5,200	0,572	0,300	1,500	0,100	250	10,7
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	Stage IIIA	2006	2010	3,404	0,511	0,200	1,500	0,100	250	10,7
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	Stage IIIB	2011	2013	1,800	0,270	0,171	1,500	0,023	250	10,7
Diesel	NRMM	F	130<=P<560	Stage IV	2014	9999	0,360	0,054	0,171	1,500	0,023	250	10,7

Table B.5 fortsat.

Fuel type	Direktivv	St. kode	Effektint.	Emissionstrin	Årsint.		Årsint. g/kWh	NO ₂ g/kWh	VOC g/kWh	CO g/kWh	TSP g/kWh	Fuel g/kWh	Fuel MJ/kWh
					Startår	Startår							
Diesel	Vej			Euro 0	0	1993	11,429	1,257	5,500	12,857	1,525	250	10,7
Diesel	Vej			Euro I	1994	1996	8,000	0,880	1,100	4,500	0,610	201	8,6
Diesel	Vej			Euro II	1997	2001	7,000	0,770	1,100	4,000	0,250	190	8,1
Diesel	Vej			Euro III	2002	2006	5,000	1,100	0,660	2,100	0,130	203	8,7
Diesel	Vej			Euro IV	2007	2009	3,500	0,490	0,460	1,500	0,020	190	8,1
Diesel	Vej			Euro V	2010	2014	2,000	0,200	0,460	1,500	0,020	193	8,3

Fuel type	Direktivv	St. kode	Motorvol.	Emissionstrin	Årsint.		NO _x g/s	NO ₂ g/s	VOC g/s	CO g/s	TSP g/s	Fuel g/s	Fuel MJ/s
					Startår	Slutår							
Benzin	Vej	Pb	> 2l	ECE 15/00-01	1970	1978	8,22E-03	3,29E-04	1,57E-02	1,67E-01	2,63E-04	0,651	0,028
Benzin	Vej	Pb	> 2l	Euro 1	1990	1996	3,62E-03	1,45E-04	2,91E-03	2,51E-02	1,33E-05	0,493	0,022
El	i.d.	i.d.		i.d.			0	0	0	0	0	0	0

[Tom side]

OPGØRELSE AF EMISSIONER OG ANTAL PARTIKLER PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP

DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet har i foråret 2013 lavet en opgørelse for antallet af partikler udledt i Københavns Lufthavn Kastrup. Opgørelsen er udarbejdet i relation til arbejdsmiljø og bygger oven på de tidligere undersøgelser, som DCE gennemførte i perioden 2009-2011 med det formål at undersøge niveauet af luftforurening på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup. Opgørelsen beregnes ved at kombinere den eksisterende opgørelse over brændstofforbrug fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpe-motorer (APU), handlingsudstyr og vejgående køretøjer, med faktorer for antal partikler per kg brændstof hentet fra den videnskabelige litteratur. Opgørelsen er opdelt i 5 m x 5 m gitterceller og hver celle indeholder aktivitetsopdelte partikelantal med angivelse af tidspunkt for de enkelte udslip. I modsætning til partikelmasse er handlingsmaskiner en lille kilde til antal partikler udledt på forpladsen, pga. de generelt meget lave emissionsfaktorer (antal partikler per kg brændstof) for dieselmotorer set i forhold til flymotorer. Emissionsandelen for handlingsmaskiner beregnes til 2,5 %. Den største emissionsandel beregnes for APU motorer (54 %), efterfulgt af hovedmotorer (43 %). I hele lufthavnen er hovedmotorer langt den største kilde. Der er en vis usikkerhed i de beregnede partikelantal for hovedmotorer og APU pga. en stor variation i de rapporterede emissionsfaktorer for hovedmotorer, og for APU i særlig grad pga. det lave antal tilgængelige målinger. Derfor kan den relative betydning af de to hovedkilder hovedmotor og APU godt ændre sig, når ny emissionsviden foreligger, mens der ikke forventes større ændringer i konklusionen om, at handlingskøretøjerne kun spiller en meget lille rolle i forbindelse med det udledte antal partikler i lufthavnen.