



UNDERSØGELSE AF LUFTFORURENINGEN PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP I RELATION TIL ARBEJDSMILJØ

Teknisk rapport fra DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi

nr. 5

2011



AARHUS
UNIVERSITET
DCE - NATIONALT CENTER
FOR MILJØ OG ENERGI

[Tom side]

UNDERSØGELSE AF LUFTFORURENINGEN PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP I RELATION TIL ARBEJDSMILJØ

Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi

nr.5

2011

Thomas Ellermann
Andreas Massling
Per Løfstrøm
Morten Winther
Jacob Nøjgaard
Matthias Ketzel

Aarhus Universitet, Institut for Miljøvidenskab



Datablad

- Serietitel og nummer: Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 5
- Titel: Undersøgelse af luftforureningen på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø
- Forfattere: Thomas Ellermann, Andreas Massling, Per Løfstrøm, Morten Winther, Jacob Nøjgaard & Matthias Ketzel
- Institution: Institut for Miljøvidenskab
- Udgiver: DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet
URL: <http://dmu.au.dk>
- Udgivelsesår: November 2011
- Faglig kommentering: Helge Rørdam Olesen
- Finansiel støtte: Københavns Lufthavn A/S
- Bedes citeret: Ellermann, T., Massling, A., Løfstrøm, P., Winther, M., Nøjgaard, J. K. & Ketzel, M.. 2011. Undersøgelse af luftforureningen på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø. DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet. 148 s. - Teknisk rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 5. <http://www2.dmu.dk/Pub/TR5.pdf>
- Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse
- Sammenfatning: DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet har i perioden 2009 til 2011 lavet en undersøgelse af luftkvalitet på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø. Undersøgelsen, der er udført for Københavns Lufthavn A/S, omfatter målinger af luftforureningen på forpladsen, udarbejdelse af emissionsopgørelse for Københavns Lufthavn Kastrup og modelberegninger af luftforureningen på basis af emissionsopgørelsen. Kvælstofoxider, massen af partikler med diameter under 2,5 µm (PM_{2,5}), partikelantal og udvalgte organiske luftforureningskomponenter (herunder polycykliske aromatiske hydrocarboner) har indgået i undersøgelsen. Resultaterne viser, at koncentrationsniveauerne for hovedparten af de undersøgte luftforureningskomponenter ligger på niveau med eller under niveauet på H.C. Andersens Boulevard, som er en af de mest trafikerede gader i København. Undtagen partikelantal, som ligger på et niveau, der er to til tre gange højere end på H.C. Andersens Boulevard. Undersøgelsen har vist, at de vigtigste kilder til luftforureningen er handlingskøretøjer, flyenes hovedmotorer og hjælpemotorer (APU).
- Emneord: Luftforurening, Kastrup Lufthavn, partikelantal, PM_{2,5}, kvælstofoxider, organisk luftforurening, emissionsopgørelse, modelberegninger
- Layout: Majbritt Ulrich
- Foto forside: Tom Jensen
- ISBN: 978-87-92825-17-9
ISSN (elektronisk): 2244-999X
- Sideantal: 148
- Internetversion: Rapporten er tilgængelig i elektronisk format (pdf) som <http://www2.dmu.dk/Pub/TR5.pdf>

Indhold

Sammenfatning 5

English Summary 9

Forord 13

1 Indledning 14

2 Målinger 17

- 2.1 Målestationer 17
- 2.2 Feltkampagne med målinger af horisontal variation på forpladsen 18

3 Resultater fra målingerne 19

- 3.1 NO₂ 19
- 3.2 PM_{2,5} 19
- 3.3 Fordeling af luftforureningen på forpladsen 20
- 3.4 Partikelantal 20
- 3.5 Vurdering af forsøg med ændret praksis omkring Station B4 21
- 3.6 Simple forsøg med sporing af kilder 22
- 3.7 SO₂-kampagnen 23
- 3.8 Luftforureningen med organiske komponenter 24
- 3.9 Delkonklusion for målinger 28

4 Emissionsopgørelser for forpladsen 30

- 4.1 Aktivitetsdata 30
- 4.2 Digitalisering af aktivitetsdata 33
- 4.3 Emissionsfaktorer 34
- 4.4 Beregningsmetode 35
- 4.5 Delkonklusion 38

5 Modelberegninger for området omkring forpladsen 40

- 5.1 Metode 40
- 5.2 Overordnet fordeling af koncentrationer i lufthavnen og nærområdet 41
- 5.3 Stationerne B4, Øst og Vest 42
- 5.4 Delkonklusion 44

6 Modelberegninger for selve forpladsen 46

- 6.1 Metode 46
- 6.2 Resultater 47
- 6.3 Delkonklusion 52

7 Konklusion 53

8 Referencer 56

Bilag 1: Målinger 58

- Målemetoder (NO, NO₂, SO₂, PM_{2,5}) 58
- Partikelantal 61
- Vindretningsafhængighed af partikelantal ved Station Vest 67

Vurdering af ændret praksis omkring Station B4 68
Indflydelse af svovl 69
Luftforureningen med organiske komponenter 70
Delkonklusion 76
Referencer 78

Bilag 2: Emissionsopgørelse 80

Indledning 80
Aktivitetsdata 81
Digitalisering af aktivitetsdata 87
Emissionsfaktorer 90
Kørende trafik 98
Beregningsmetode 99
Resultater 100
Delkonklusion 114
Referencer 115

Bilag 3: Modelberegninger for baggrunden 124

Metode 124
Overordnet fordeling af koncentrationer i lufthavnen og nærområdet 128
Resultater for målestationerne Vest, B4 og Øst 131
Analyse af koncentrationer og vindretning 134
Resultater for horisontal variation på forpladsen 136
Delkonklusion 138
Referencer 138

Bilag 4: Modelberegninger for forpladsen 140

Metode 140
Variation af koncentrationer med vindretning 142
Årsmiddelkoncentrationer på forpladsen 144
Delkonklusion for modelberegninger på forpladsen 147
Referencer 148

Sammenfatning

Nærværende rapport er udarbejdet til Københavns Lufthavne A/S af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet (DCE). Rapporten præsenterer resultaterne af DCE's undersøgelse af luftforureningen på forpladsen¹ i Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø. Undersøgelsen er udført i perioden 2009 til 2011.

Formålet med undersøgelsen er at kortlægge luftforureningen på forpladsen på lufthavnen og bestemme kilderne til luftforureningen. Undersøgelsen har fokus på arbejdsmiljøet. Derfor er der lagt vægt på at bestemme luftforureningen i de områder, hvor personalet på forpladsen arbejder.

Undersøgelsen omfatter de luftforureningskomponenter, som mistænkes for at kunne give anledning til arbejdsmiljøproblemer på forpladsen. Det drejer sig om følgende: Kvælstofoxider (NO og NO₂), svovldioxid (SO₂), massen af partikler med diameter under 2,5 µm (PM_{2,5}), partikelantal² og deres størrelsesfordeling, elementært kulstof (sod), polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) og udvalgte flygtige organiske stoffer (VOC).

Undersøgelsen er baseret på en kombination af målinger, opgørelse af udledninger og modelberegninger. De væsentligste delelementer er følgende:

- Måling af kvælstofoxider og PM_{2,5} på forpladsen ved Gate B4 (Station B4). Målingerne af disse stoffer ved udkanten af Københavns Lufthavn (Station Øst og Vest) inkluderes også i undersøgelsen. Disse målinger foretages af DCE for Københavns Lufthavne A/S i forbindelse med overvågningen af luftkvaliteten ved udkanten af Københavns Lufthavn.
- Måling af partikelantal (6 – 700 nm i diameter)³ og størrelsesfordeling af partiklerne ved Gate B4 og ved de to stationer i udkanten af lufthavnen (Station Øst og Vest).
- Målekampagne med måling af den geografiske fordeling af luftforureningen på forpladsen.
- Målekampagne med måling af PAH og udvalgte VOC samt partikelbundet organisk kulstof og elementært kulstof (sod),
- Målekampagne med måling af svovldioxid ved Gate B4.
- Opgørelse over udledninger fra kilder i lufthavnen. Opgørelsen omfatter udledninger af kvælstofoxider, PM_{2,5}, VOC, carbonmonoxid (CO) og det samlede brændselsforbrug (jet fuel, diesel m.m).

¹ Forpladsen er den del af lufthavnen, hvor flyene holder ved gatene.

² I rapporten anvendes udtrykket "partikelantal" som et kort udtryk for koncentrationen af partikler målt som antal per volumen (partikler per cm³).

³ Ultrafine partikler (diameter under 100 nm) udgør typisk fra 75-95% af det samlede partikelantal (6 – 700 nm).

- Modelberegninger af niveauerne og kilderne til luftforureningen. Modelberegningerne omfatter kun kvælstofoxider og PM_{2,5}. Modelberegningerne for selve forpladsen er udført med en geografisk opløsning på 5 m x 5 m for bedst muligt at kunne tage højde for placering af kilder i forhold til arbejdsområderne og bygningernes indvirkning på spredning af luftforureningen.

Undersøgelsen har ført til følgende hovedkonklusioner:

Koncentrationerne af kvælstofoxider og svovldioxid på forpladsen ligger under de niveauer, som måles på H.C. Andersens Boulevard (HCAB) i forbindelse med den danske overvågning af luftkvalitet. HCAB er en af de mest trafikerede bygader i København (omkring 60.000 køretøjer dagligt). Koncentrationerne ligger også under EU's grænseværdier for luftkvalitet for disse to stoffer.

Målingerne af VOC omfatter stoffer, der dels findes i baggrundsluften og dels forventes at komme fra kilderne på forpladsen (køretøjer og fly) og som kan give effekter på helbredet. Koncentrationerne af de målte VOC ligger på niveau med bybaggrunden i København. N-octan og trimethylbenzenerne, der kan relateres til jet fuel, ligger på et niveau på 2-6 gange niveauerne målt i bybaggrund, men der er dog tale om lave koncentrationer. Målingerne af VOC bliver ikke foretaget på HCAB, så der kan ikke laves en sammenligning med niveauerne på en stærkt trafikeret gade. Undtagen benzen, hvor resultaterne viser, at koncentrationen af benzen på forpladsen ligger under såvel niveauet på HCAB som under EU's grænseværdi.

Målingerne omfatter også aldehyder, som kan give irritation af øjne, næse og hals og som kan stamme fra afbrænding af jet fuel. De gennemsnitlige koncentrationer (8 timers middelværdier) af aldehyder på forpladsen ligger betydeligt under de niveauer, som forventes at give irritation. Dog kendes koncentrationsniveauerne ikke for spidsbelastninger i kortere tidsrum.

Undersøgelsen har omfattet en række aspekter af partikelforureningen i lufthavnen. Resultaterne viser, at partikelantallet er omkring to til tre gange større på forpladsen end på HCAB. De meget små partikler med diameter mellem 6 og 40 nm udgør omkring 85 - 90% af det samlede partikelantal på forpladsen. Det er netop for denne partikelfraktion, der er stor forskel mellem forpladsen og HCAB. Disse partikler stammer hovedsageligt fra forbrænding af jet fuel og diesel på forpladsen. Ved udkanten af lufthavnen (Station Øst og Vest) ligger partikelantal 20 - 40 % under niveauet på HCAB.

De større partikler med diameter op til 2,5 µm måles ved deres masse og betegnes PM_{2,5}. Niveauet for PM_{2,5} på forpladsen svarer omtrent til HCAB, mens PM_{2,5} ved Station Øst og Vest ligger på et niveau mellem HCAB og bybaggrund i København. Disse partikler stammer hovedsageligt fra kilder uden for lufthavnen.

Indholdet af PAH i partiklerne på forpladsen ligger på omkring en tredjedel eller mindre i forhold til de koncentrationer, som måles på HCAB. Ligeledes ligger niveauet under de niveauer, der blev målt på forpladsen på Leonardo Da Vinci Lufthavn i Rom. Der skal dog tages forbehold for

at betingelserne for prøveopsamlingen varierede en del mellem undersøgelserne på lufthavnene i København og Rom (Cavallo et al., 2006) . EU har fastlagt en grænseværdi for luftkvalitet af benzo[a]pyren, der anses for at repræsentere luftforureningen med de kræftfremkaldende PAH'er. Målingerne på forpladsen viser, at målværdien ikke overskrides.

Målingerne har også omfattet mængden af elementært kulstof (EC; også kaldet sod) i partiklerne, som i lufthavnen ligger på lidt under halvdelen af niveauet på HCAB. Til gengæld ligger mængden af organisk bundet kulstof (OC) på niveau med HCAB, hvilket viser, at der må være en kilde til disse stoffer på eller tæt ved lufthavnen. Dette er ikke undersøgt nærmere.

Det er udarbejdet en geografisk detaljeret opgørelse over udledninger af kvælstofoxider, partikler, flygtige organiske stoffer og carbonmonoxid (CO). Usikkerheden på opgørelsen er relativt stor grundet de mange hundrede forskellige kilder til luftforureningen på forpladsen.

For kvælstofoxider og partikler kommer den største andel af udledningerne på forpladsen fra handlingskøretøjerne⁴ efterfulgt af flyenes APU (hjælpemotor), flyenes hovedmotorer og den mindste andel fra almindelig trafik på forpladsen. For de flygtige organiske forbindelser og CO stammer hovedparten af udledningerne fra flyenes hovedmotorer.

Opgørelsen af udledningerne har endvidere peget på, at op mod halvdelen af partikeludledningerne fra flyenes hovedmotorer skyldes svovlindholdet på omkring 900 ppm i jetfuel fra lufthavnen. Ved afbrænding af svovlholdigt brændsel dannes sulfatholdige ultrafine partikler. Målinger af svovldioxid peger ligeledes på en kobling mellem svovl og det store antal ultrafine partikler.

Modelberegningerne viste for høje koncentrationer af kvælstofoxiderne på forpladsen set i forhold til målingerne. En detaljeret sammenligning mellem modelresultater og målinger peger på, at det primært er opgørelsen af udledningerne på forpladsen, der giver anledning til forskellen mellem målingerne og modellen. På basis af denne viden er det derfor ønskeligt at genvurdere de grundlæggende data bag opgørelsen af udledningerne. Dette har desværre ikke været muligt inden for rammerne af nærværende undersøgelse. I stedet er de foretaget estimer, hvor den samlede information fra modelberegninger og målinger er udnyttet bedst muligt, idet modelresultaterne er justeret på grundlag af målinger. Hermed kan man bruge de informationer modelberegningerne giver om den rumlige fordeling af forureningen og om kildernes relative bidrag.

Beregningerne viser at kvælstofoxiderne (NO_x) på forpladsen primært kommer fra baggrund (44 %) og handling (41 %) med mindre bidrag fra APU (7 %), hovedmotorer (7 %) og trafik på forpladsen (1 %). De angivne tal gælder for Station B4, som er placeret ved Gate B4.

Modelberegningerne viser, at PM_{2,5} på forpladsen primært kommer fra baggrund (91 %) med mindre bidrag fra handling (5,5 %), APU (3,4 %), hovedmotorer (0,4 %) og trafik på forpladsen (0,1 %).

⁴ Handling er den servicereingen af flyene, som sker i forbindelse ved ankomst og afgang..

Modelberegningerne viser endvidere, at forpladsen er det sted i lufthavnen, hvor personel er mest udsat for forhøjede niveauer af kvælstofoxider og PM_{2,5}.

Som det er nævnt ovenfor har projektet ikke omfattet opgørelse over udledninger af partikler på forpladsen når det drejer sig om partikelantallet. Det har derfor ikke været muligt at lave en egentlig vurdering af kilderne til partikelantal på basis af modelberegningerne. Det forventes dog, at handling, APU og hovedmotorer er de væsentligste kilder til partikelantallet, mens baggrunden spiller en mindre rolle. Det har ikke været muligt at foretage en vægtning af, hvor stor en andel af partikelantallet, som kommer fra handling, APU og hovedmotor. Tiltag til reduktion af det høje partikelantal på forpladsen bør derfor ske ved at sætte ind overfor alle disse kilder.

Sammenfattende kan det konkluderes, at for hovedparten af de undersøgte luftforureningskomponenter (kvælstofoxider, PM_{2,5}, partikelbundet organisk kulstof og elementært kulstof, VOC og PAH) ligger niveauerne på forpladsen under de niveauer, som måles på HCAB. Endvidere gælder, at for de luftforureningskomponenter, hvor der eksisterer grænseværdier for luftkvalitet overholdes disse på forpladsen.

Partikelantallet er den væsentligste afvigelse fra dette billede, da partikelantallet målt på forpladsen ligger omkring to-tre gange højere end på HCAB. Der eksisterer ingen luftkvalitetsgrænseværdier for partikelantallet.

English Summary

This report presents results from a survey on the air pollution at the apron⁵ of Copenhagen Airport in relation to working environment. The survey has been carried out during the period 2009 to 2011 by DCE - Danish Centre for Environment and Energy, Aarhus University (DCE) for Copenhagen Airports A/S.

The aim of the survey was to map the air pollution at the apron of the airport and to determine the sources of the air pollution. The study focuses on the working environment. Therefore, the emphasis is on determination of air pollution in those areas of the apron where staff is working.

The survey includes the air pollutants that are suspected to cause problems for the working environment at the apron. These are the following: Nitrogen oxides (NO and NO₂), sulphur dioxide (SO₂), the mass of particles with diameter below 2.5 µm (PM_{2.5}), particle number⁶ and their size distribution, particulate elemental carbon (soot), polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH) and selected volatile organic compounds (VOC).

The survey is based on a combination of measurements, compilation of an emission inventory and model calculations. The main elements are:

- Measurement of nitrogen oxides and PM_{2.5} at the apron close to Gate B4 (Station B4). Measurements of these compounds on the outskirts of Copenhagen Airport (Station East and West) are also included in the study. These measurements are performed by DCE for Copenhagen Airports A/S in connection with the air quality monitoring at Copenhagen Airport.
- Measurements of particle number (6 – 700 nm in diameter)⁷ and particle size at Gate B4 and at the two stations on the outskirts of the airport (Station East and West).
- Measuring campaign with the measurement of the spatial distribution of air pollution at the apron.
- Measuring campaign with the measurement of PAH, selected VOC, particulate organic carbon and elemental carbon (soot).
- Measuring campaign with the measurement of sulphur dioxide at Gate B4.
- Compilation of an emission inventory on the sources at the airport. The inventory includes emissions of nitrogen oxides, PM_{2.5}, VOC, carbon monoxide (CO) and total fuel consumption (jet fuel, diesel, etc.).

⁵ Apron is the part of the airport where the airplanes are parked near the gates.

⁶ In this report the expression “particle number” is used as a short expression for the concentration of the number of particles per volume (particles per cm³)

⁷ Ultrafine particles (diameter below 100 nm) accounts typically for 75-95% of the particle number with diameter between 6 and 700 nm.

- Modelling of the air pollution levels and source contributions. The model calculations include only nitrogen and PM_{2.5}. Model calculations for the apron itself is performed with a spatial resolution of 5 m x 5 m in order to best address the location of sources relative to the working areas and the buildings impact on the dispersion of air pollution.

The study has led to the following main conclusions:

The concentrations of nitrogen oxides and sulphur dioxide on the apron are below the levels at H.C. Andersens Boulevard (HCAB) measured in connection with the Danish air quality monitoring. HCAB is one of the busiest streets in Copenhagen (approximately 60,000 vehicles per day). Concentrations are also below the EU air quality limit values for these two compounds.

Measurements of VOC include substances that are partly found in the background air and partly expected to come from sources at the apron (vehicles and aircraft) and which can cause adverse health effects. The concentrations of the measured VOC are at the level found in urban background air in Copenhagen. N-octane and trimethyl benzene, which are related to jet fuel, are at a level of 2-6 times the levels measured in urban background, however the concentrations are still low. VOC are not measured at HCAB, and can therefore not be compared with the levels at a busy street. Only benzene is measured at HCAB, and the measured benzene concentrations at the apron are below the levels at HCAB as well as the EU limit value.

Measurements also include aldehydes, which can cause irritation of eyes, nose and throat and can originate from burning of jet fuel. The average concentrations (8 hour mean values) of aldehydes at the apron are significantly below the levels expected to give irritation. However, the peak concentrations for shorter time periods are unknown.

The study included a number of aspects on particle pollution in the airport. The results show that the particle number (6 – 700 nm) was about two to three times higher at the apron compared to HCAB. 85-90% of the particle number consist of particles with a diameter between 6 – 40nm. It is this particle fraction that accounts for the difference between the particle number at the apron and HCAB. The ultrafine particles originate from the combustion of jet fuel and diesel at the apron. At the outskirts of the airport, the particle number is about 20 – 40 % lower than at HCAB.

The larger particles with diameters up to 2,5 µm are measured by their mass and called PM_{2.5}. The PM_{2.5} level at the apron is approximately equivalent to HCAB while the PM_{2.5} level at Station East and West lies between the levels measured at HCAB and as the urban background in Copenhagen. These particles originate mainly from sources outside the airport.

The content of PAH in the particles at the apron is about one third or less compared to concentrations measured at HCAB. The PAH levels are also below the levels measured at the apron at the Leonardo Da Vinci Airport in Rome (Cavallo et al., 2006). The EU has set a limit value for air quality

of benzo[a]pyrene, which is considered as representative for the carcinogenic PAH. Measurements at the apron show that the limit value is not exceeded.

Measurements also included the amount of elemental carbon (EC, also known as soot) in the particles. The levels at the airport is slightly less than half of the level measured at HCAB. On the other hand, the amount of particulate organic carbon (OC) is at the same level as at HCAB, indicating that there must be a source of these substances on or near to the airport. This has not been studied in detail.

A geographically detailed emission inventory was compiled for nitrogen oxides (NO + NO₂), particulates (PM_{2.5}), volatile organic compounds and carbon monoxide (CO). The uncertainty of the inventory is relatively high due to the many hundreds of different air pollution sources at the apron.

For nitrogen oxides and particulates, the greatest share of emissions originates from handling vehicles⁸, followed by the aircraft's APU's (auxiliary power units), aircraft main engines and the smallest proportion from the general traffic at the apron. For the volatile organic compounds and CO the emissions are dominated by contributions from aircraft main engines.

Furthermore, the emission inventory indicates that up to half of the particle emissions from aircraft main engines are due to the high sulphur content of about 900 ppm in the jet fuel. The combustion of sulphate-rich fuels leads to the formation of sulphur-containing ultrafine particles. Measurements of sulphur dioxide also indicate a linkage between sulphur and the large particle number.

Model calculations have shown higher concentrations of nitrogen oxides at the apron compared to the measurements. A detailed comparison between model results and measurements indicate that the most likely reason for the difference between measurements and model is that the emissions inventory results in too high emissions at the apron. On this background it is desirable to review the basic input data behind the emission inventory. This has unfortunately not been possible within the framework of this study. Instead, the model results have been adjusted empirically on the basis of the measurements. In this way the model calculations can be used to determine the spatial distribution of pollution and the relative source contributions.

The calculations show that nitrogen oxides (NO_x) at the apron originates primarily from background (44%) and handling (41%) with smaller contributions from the APU (7%), main engines (7%) and traffic at the apron (1%). The numbers refer to Station B4, which is located at Gate B4.

Model calculations show that PM_{2.5} at the apron comes primarily from background (91%) with smaller contributions from handling (5.5%), APU (3.4%), main engines (0.4%) and traffic at the apron (0,1%).

⁸ Handling is the service in and around the aircrafts, which occurs at arrival and departure.

Model calculations show that the apron is the place at the airport, where staff is most likely exposed to elevated levels of nitrogen oxides and PM_{2.5}.

As mentioned above, the project did not include an extension of the emission inventory for particle numbers. It has therefore not been possible to make a proper assessment of the sources of particle number on the basis of model calculations. However, it is expected that handling, APU and main engines are the major sources for particle number while the background plays a minor role. Measures taken to reduce the high particle number at the apron should involve reduction measures for all the expected major sources.

In summary it can be concluded that for the majority of the investigated air pollutants (nitrogen oxides, PM_{2.5}, PAH, VOC, particulate organic and elemental carbon) the concentrations at the apron are below the levels measured at HCAB. Furthermore, at the apron there are no measured exceedances of the air quality limit values for those air pollutants where limit values exist.

The particle number is the only deviation from this picture, since the levels measured at the apron is about two to three times higher than at HCAB. There is no air quality limit value for particle number.

Forord

Nærværende projekt er udført af *DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi*, Aarhus Universitet for Københavns Lufthavne A/S. En ændret organisationsstruktur ved Aarhus Universitet indebærer, at DCE fra den 1. juli 2011 er trådt i stedet for det hidtidige Danmarks Miljøundersøgelser som indgangen for myndigheder, erhverv og offentligheden til Aarhus Universitets faglige miljøer inden for natur, miljø og energi.

Medarbejdere ved lufthavnen takkes for godt samarbejde omkring gennemførelse af undersøgelsen.

1 Indledning

Nærværende rapport er udarbejdet til Københavns Lufthavne A/S i efteråret 2011 af DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet (DCE). Rapporten sammenfatter resultaterne fra DCE's undersøgelse af luftforureningen på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø. Denne undersøgelse er udført for Københavns Lufthavne A/S i perioden 2009 til 2011.

Det overordnede formål med undersøgelsen er:

- at undersøge niveauet af luftforurening på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup på basis af emissionsopgørelser, målinger og modelberegninger,
- at kvantificere kilderne til luftforureningen på forpladsen,
- at vurdere effekten af lufthavnens miljøtiltag på luftkvaliteten i det omfang resultaterne fra undersøgelse tillader det,
- at sammenligne niveauer af luftforurening på forpladsen med niveauer målt på gadeniveau og i bybaggrund i København.

Undersøgelsen forholder sig således udelukkende til luftforureningen, mens vurdering af eventuelle sundhedseffekter af luftforureningen ikke indgår i projektet.

Undersøgelsen omfatter de luftforureningskomponenter, som udledes fra kilder på forpladsen og som potentielt kan give anledning til sundhedsskadelige effekter i forbindelse med arbejde på forpladsen. Det drejer sig om følgende:

- Kvælstofoxider (NO, NO₂)
- Svovldioxid (SO₂)
- Massen af partikler med diameter under 2,5 µm (PM_{2,5})
- Antallet af ultrafine partikler og størrelsesfordeling af de ultrafine partikler
- Elementært kulstof, også betegnet sod
- Polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH)
- Udvalgte flygtige organiske stoffer (VOC) herunder benzen og toluen

Disse luftforureningskomponenter er udvalgt på basis af DCE's generelle viden om sundhedsskadelig luftforurening og viden om niveauer af luftforureningen med disse komponenter i Danmark. Relevansen af disse luftforureningskomponenter understøttes også af notat fra Niels Ebbehøj (Bispebjerg Hospital), som nævner de sundhedsskadelige effekter af disse stoffer.

Oprindeligt bestod undersøgelsen af syv delprojekter, der omhandlede følgende:

- 1. Måling af partikler og NO_x på forpladsen.** Der opstilles en målestation på forpladsen tæt på arbejdsområder med høje koncentrationer af partikler og NO_x. Målestationen udstyres med automatisk måleudstyr (såkaldte monitører) til måling af partikler (PM_{2,5}) og NO_x. Disse målinger foretages med tidsopløsning på ½ time kontinuert fra opstilling af målestation i september 2009 og til 31. januar 2010. Endvidere foretages målinger af ultrafine partikler i efteråret 2010. Målingerne af de ultrafine partikler har ligeledes tidsopløsning på ½ time. Resultaterne sammenlignes med resultater fra den danske luftkvalitetsovervågning.
- 2. Supplerende målinger af partikler på overvågningsstationerne.** Københavns Lufthavn A/S foretager allerede overvågning af partikler (PM_{2,5}) og NO_x på lufthavnens to overvågningsstationer (se Figur 2.1). Ved at sammenligne disse målinger med målingerne på forpladsen kan kildefordelingen for ultrafine partikler vurderes. Målingerne udføres i efteråret 2010 parallelt med målingerne i delprojekt 1.
- 3. Kampagnemålinger af PAH, sod og flygtige organiske stoffer (VOC) på forpladsen.** I forbindelse med målestationen på forpladsen foretages én målekampagne af en måneds varighed, hvor der indsamles prøver til analyse af PAH, elementært kulstof (sod) og en række flygtige organiske stoffer. Hermed fås viden om niveauet af denne type sundhedsskadelige stoffer. Målingerne af PAH og sod sammenlignes med tilsvarende resultater fra den danske luftkvalitetsovervågning.
- 4. Måling af horisontal variation på forpladsen.** Der opstilles 15-20 simple prøveopsamlere til bestemmelse af PM_{2,5}, NO₂ og benzen spredt ud over forpladsen. Herved fås et billede af den horisontale variation af disse luftforureningskomponenter på forpladsen og dermed et billede af, hvor udbredt eventuelle problemer med forureningen måtte være. Denne information er endvidere vigtig for at vurdere, hvor repræsentativ målestationen på forpladsen er (delprojekt nr. 1) og kan benyttes til sikring af kvaliteten af modelberegningerne. Målingerne foretages igennem en periode på fem uger.
- 5. Emissionsopgørelser.** I delprojektet udarbejdes opgørelse over emissionerne af de udvalgte luftforureningskomponenter fra aktiviteterne på forpladsen (diverse køretøjer og fly) og fra fly i forbindelse med taxi, start og landing. Emissionsopgørelserne skal anvendes i forbindelse med vurdering af kilderne til luftforureningen og som "input" til modelberegningerne i delprojekterne nr. 6 og 7.
- 6. Modelberegning af luftforurening fra den øvrige lufthavn og København.** Ved hjælp af modellen "OML-Multi" udføres modelberegning af transporten af luftforurening hen til forpladsen fra kilder i den øvrige lufthavn og i København samt fra den regionale baggrund. Resultaterne fra modelberegningerne indgår dels i vurdering af forskellige kilders bidrag til den samlede luftforurening på forpladsen og dels som "input" til modelberegningerne for selve forpladsen (delprojekt nr. 7).

7. **Modelberegning af luftforureningen på forpladsen.** I delprojektet udføres avancerede modelberegninger med en CFD-model (Computational Fluid Dynamics). Modellen har meget høj geografisk opløsning (på få meter), og den kan derfor anvendes til at udføre detaljerede beregninger af luftens turbulens og strømning omkring bygningerne på forpladsen. Modellen kan beregne den lokale spredning af luftforurening fra kilder på forpladsen under de lokale meteorologiske forhold. Resultaterne vil have fokus på de helt lokale luftforureningsniveauer i forbindelse med handling af fly. Endvidere giver modelberegningerne et "billede" af den horisontale variation af luftforureningen på forpladsen, således at eventuelle områder med høje koncentrationer kan identificeres.

Den oprindelige undersøgelse er efterfølgende blevet udvidet, således at en række af målingerne er blevet fortsat i 2011. I 2011 er målingerne ved målestationen på forpladsen blevet forlænget til hele 2011, måleprogrammet er udvidet med målinger af ultrafine partikler ved Station Vest, og der er inkluderet en mindre kampagne med måling af SO₂ i februar-marts 2011.

I rapporten gives først en kort beskrivelse af målestationerne og et overblik over de udførte målinger (Kapitel 2), hvorefter hovedresultaterne gennemgås (Kapitel 3 – 7). Denne gennemgang lægger vægt på de vigtigste resultater og er begrænset i omfang. I Kapitel 8 gives en opsummering af hovedkonklusionerne. Herefter gives en mere udførlig gennemgang af metoder og resultater i fire bilag, som dækker de forskellige dele af undersøgelsen.

2 Målinger

2.1 Målestationer

Målingerne blev foretaget ved målestationen placeret ved Gate B4 (kaldet Station B4), Station Vest og Station Øst. De to sidstnævnte stationer indgår i den løbende overvågning af luftkvaliteten ved randen af Kastrup Lufthavn. Placeringen af målestationerne er vist på Figur 2.1. Tabel 2.1 viser, hvilke luftforureningskomponenter, der måles ved de tre målestationer.

Målingerne ved Station B4 blev begyndt i november 2009. DCE overtog ansvaret for drift af målingerne ved Station Øst og Vest den 1. januar 2009, men det er kun målinger foretaget fra november 2009 og senere, der er inkluderet i denne undersøgelse.



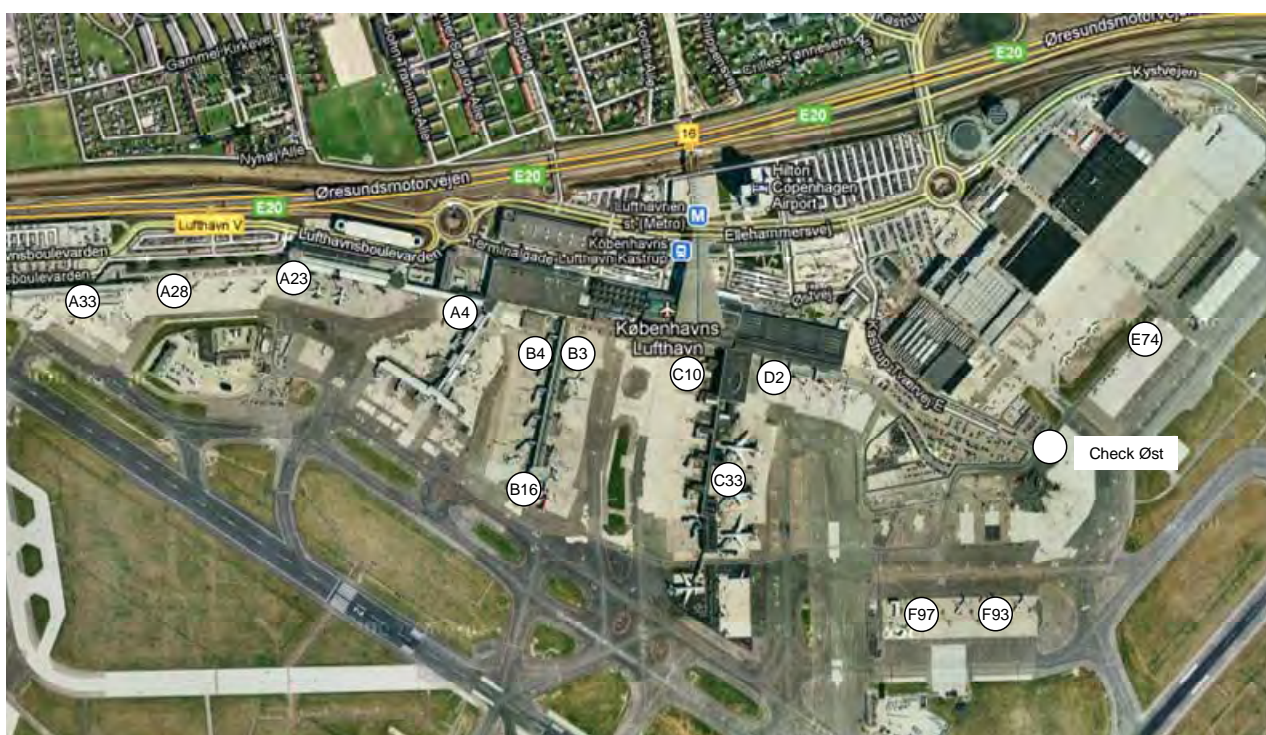
Figur 2.1. Placering af Station B4, Station Vest og Station Øst. Endvidere angives nummerering af startbanerne. Kort: Google Earth.

Tabel 2.1. Oversigt over målingerne på de tre faste målestationer. X angiver kontinuerte målinger og kampagne angiver, at målingerne kun er foretaget i forbindelse med målekampagner af 1-5 måneders varighed.

Luftforureningskomponent	Station B4	Station Vest	Station Øst
NO, NO ₂ , NO _x	X	X	X
Partikelmasse, PM _{2,5}	X	X	X
Antal af ultrafine partikler	X	Forår 2011	Efterår 2010
Elementært kulstof (sod)	Kampagne		
Benzen, toluen, xylene	Kampagne		Kampagne
Flygtige organiske forbindelser	Kampagne		
PAH, partikulært bundet	Kampagne		

2.2 Feltkampagne med målinger af horisontal variation på forpladsen

For at få viden om den horisontale variation af luftforureningen på forpladsen inkluderede undersøgelsen en målekampagne, hvor der i en fem-ugers periode fra 24. juni 2010 til 28. juli 2010 blev foretaget målinger på 15 målesteder. Målingerne omfattede NO₂, PM_{2,5}, benzen og toluen målt med midlingstid på 1 uge. Til disse målinger blev der anvendt simpelt og forholdsvis billigt udstyr, hvilket var en forudsætning for, at der kunne måles på så mange målesteder. De 15 målesteder blev udvalgt i et samarbejde mellem DCE, Københavns Lufthavne A/S og repræsentanter for medarbejderne på forpladsen. Placering af målestederne fremgår af Figur 2.2.



Figur 2.2. Placering af de 14 målesteder i feltkampagnen med måling af den horisontale variation på forpladsen. Placering af det femtende målested, Station Øst, fremgår af Figur 2.1. Kort: Google Earth.

3 Resultater fra målingerne

3.1 NO₂

Årsmiddelkoncentrationerne for NO og NO₂ fremgår af Tabel 3.1. Koncentrationerne af NO₂ på forpladsen ved Station B4 er under halvdelen af koncentrationerne på H.C. Andersens Boulevard (HCAB) og ligger på omkring halvdelen af luftkvalitetsgrænseværdien. Koncentrationerne på Station Vest og Øst svarer til niveauet i bybaggrund i København. "Bybaggrund" er luft, der repræsenterer det generelle luftforureningsniveau i byen i nogen afstand fra lokale kilder. Resultater af målinger foretaget på taget af H.C. Ørsted Institutet i Universitetsparken i København (HCØ) kan tages som udtryk for bybaggrunden. Målinger foretaget ved Lille Valby/Risø kan tages som udtryk for det regionale (landlige) baggrunds niveau.

Tabel 3.1. Årsmiddelkoncentrationer for NO, NO₂ og NO_x samt luftkvalitetsgrænseværdi for NO₂ (EU, 2008). Målingerne på HCAB, HCØ og Lille Valby/Risø er foretaget i forbindelse med den danske luftkvalitetsovervågning (Ellermann et al., 2011).

2010	Antal målinger dage	NO µg/m ³	NO ₂ µg/m ³	NO _x µg/m ³ (som NO ₂)
Forplads – B4	355	9	24	38
Station Vest	345	3	16	21
Station Øst	349	5	18	25
HCAB	316	51	56	134
HCØ	344	2	17	21
Lille Valby/Risø	307	1	11	12
Grænseværdi			40	

3.2 PM_{2,5}

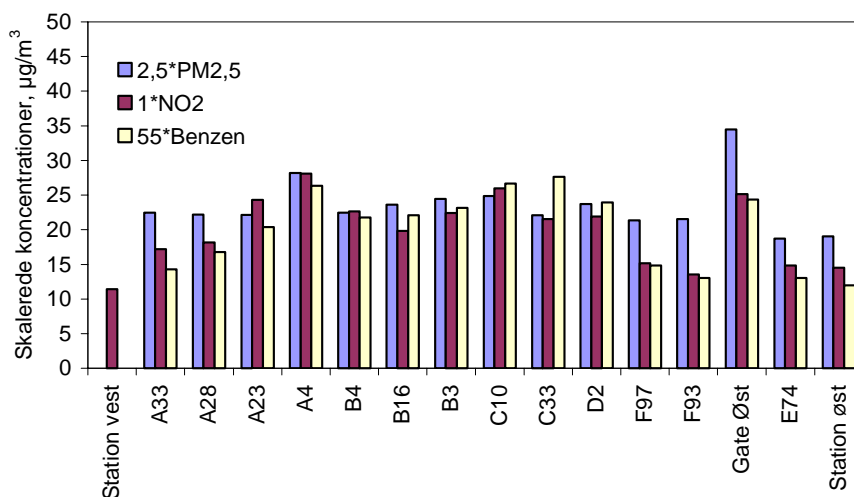
Årsmiddelkoncentrationerne for PM_{2,5} fremgår af Tabel 3.2. Koncentrationerne på forpladsen ved Station B4 svarer til niveauet på HCAB og ligger på omkring 70% af luftkvalitetsgrænseværdien, der er gældende fra 2015. Koncentrationerne på Station Vest og Øst ligger mellem HCAB og bybaggrund i København (HCØ).

Tabel 3.2. Årsmiddelkoncentrationer for PM_{2,5} samt luftkvalitetsgrænseværdi af PM_{2,5} (EU, 2008). Målingerne på HCAB, HCØ og Lille Valby/Risø er foretaget i forbindelse med den danske luftkvalitetsovervågning (Ellermann et al., 2011).

2010	Antal målinger dage	PM _{2,5} µg/m ³
Forplads – B4	206	17
Station Vest	297	15
Station Øst	327	16
HCAB	341	17
HCØ	290	14
Lille Valby/Risø	310	13
Grænseværdi (2015)		25

3.3 Fordeling af luftforureningen på forpladsen

Den geografiske fordeling af luftforureningen på forpladsen blev undersøgt for NO₂, PM_{2,5} og benzen i en målekampagne udført i uge 25-29 i 2010. I alt blev der udført målinger på 15 lokaliteter. Hertil kommer de rutinemæssige målinger på Station Vest. Fordelingen fremgår af Figur 3.1. Der ses en forholdsvis ensartet fordeling af stofferne med de højeste koncentrationer på den centrale del af forpladsen og med aftagende koncentrationer ud mod de ydre dele af forpladsen og periferien af lufthavnen. De relativt høje koncentrationer på Gate Øst skyldes hovedsageligt køretøjerne ved gaten.



Figur 3.1. Gennemsnitlige koncentrationer af PM_{2,5}, NO₂, og benzen målt i forbindelse med målekampagnen i uge 25-29, 2010. Målestederne er angivet med nærmeste gate. Koncentrationerne er skaleret således, at de svarer til niveauet for NO₂. Skaleringsfaktorerne er angivet på figuren.

3.4 Partikelantal

Antallet af partikler på forpladsen ved Station B4 ligger to til tre gange højere end på HCAB (Tabel 3.3). Ved Station Øst og Vest ligger antallet af partikler 20 til 40% under niveauet på HCAB.

Det er de meget små partikler mellem 6-40 nm, som er dominerende. På forpladsen ved Station B4 udgør de 85-90% af partiklerne (Tabel 3.3). Ved Station Øst og Vest udgør de meget små partikler omtrent 70% af det samlede antal partikler. Det er netop partiklerne med diameter fra 6-40 nm, som giver anledning til, at der på forpladsen er et meget højere partikelantal end på HCAB. For partikler med diameter på 40-109 nm og 109-700 nm ligger antallet af partikler stort set på niveau med HCAB især for målingerne i 2011, hvor datarepræsentativiteten er størst og resultaterne derfor mest sikre.

Døgnvariationen af antallet af partikler følger variationen af flyafgange og ankomster. Antallet af flyafgange er taget som et mål for den samlede aktivitet (anvendelse af flymotorer, hjælpemotor (APU) og handling m.m.) idet det formodes, at der i et vist omfang er proportionalitet mellem den samlede aktivitet og antallet af flyafgange og ankomster.

Der skal bemærkes at datarepræsentativitet er lav for målinger på HCAB i anden halvår i 2010, dog viser målinger god overensstemmelse med måling i første halvdel af 2010 og anses dermed for at være repræsentative for situationen i 2010.

Tablet 3.3. Middelværdier for det samlede antal partikler med diameter fra 6 – 700 nm, samt antal partikler fordelt på størrelsesfraktionerne 6-40 nm, 40 – 109 nm og 109 – 700 nm for tre stationer på lufthavn og 3 stationer til sammenligning. Målingerne på HCAB, HCØ og Lille Valby/Risø er foretaget i forbindelse med den danske luftkvalitetsovervågning (Ellermann et al., 2011) samt et partikelforskningsprojekt finansieret af Miljøstyrelsen (Massling et al., 2011).

Antal per cm ³	August - December 2010				Januar - Juni 2011			
	Samlet Antal	6 - 40 nm	40 -109 nm	109 - 700 nm	Samlet Antal	6 - 40 nm	40 -109 nm	109 - 700 nm
Forplads B4	31900	27900	3100	900	38600	32600	4600	1400
Station Vest					11000	7500	2500	1100
Station Øst	10000	7500	1800	700				
H. C. Andersens Boulevard	16100	9900	4700	1600	13400	7800	4100	1400
H. C. Ørstedts Institut	5500	2300	2200	1000	6500	2300	2800	1400
Lille Valby / Risø	3700	1400	1500	900	4000	1200	1700	1000

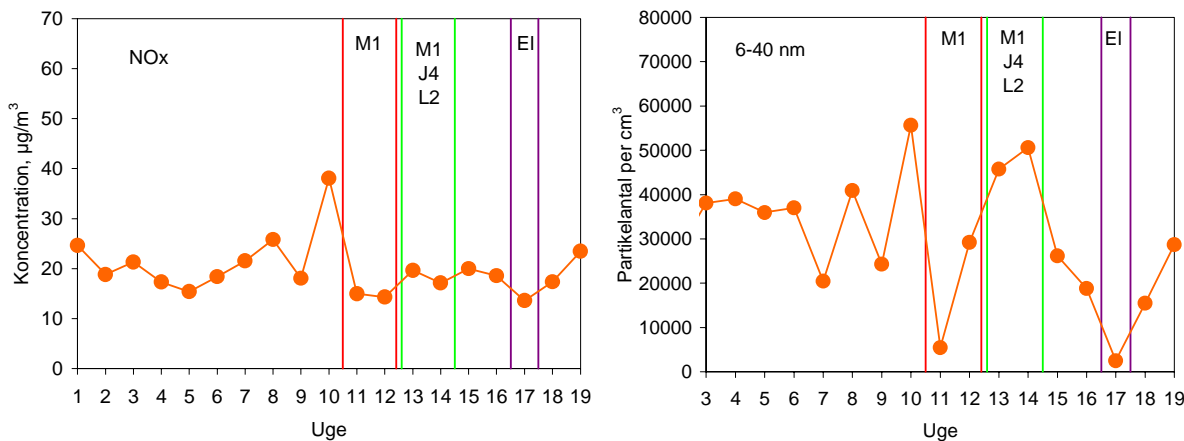
3.5 Vurdering af forsøg med ændret praksis omkring Station B4

Fra uge 11 til 17 i 2011 gennemførte Københavns Lufthavne A/S en række test for at se om ændring i praksis på forpladsen fører til reduceret luftforurening. Følgende test blev udført:

1. Uge 11-12: Opstartsposition M1 anvendes ikke
2. Uge 13-14: Opstartspositionerne M1, J4 og L2 anvendes ikke
3. Uge 17: Normal opstart, men kun anvendelse af elgrej til handling ved B4.

Figur 3.2 viser ugemiddelværdier fra kl. 7:00 til 20:00 for uge 3-19, 2011 for NOx og partikelantal ved Station B4 korrigeret for variationerne i baggrunden (korrektionen består i at trække Station Vest fra Station B4). De store variationer mellem ugerne skyldes primært variationer i de meteorologiske forhold (navnlig vindretning).

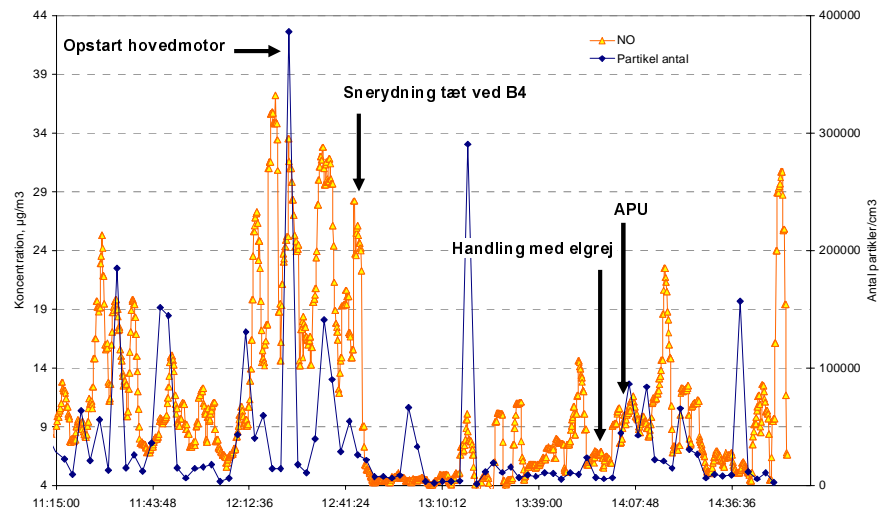
Ændringerne i praksis på lufthavnen giver relativt små ændringer i forhold til de samlede udledninger på forpladsen. Det vurderes, at det ikke har været muligt at detektere ændringerne i praksis på lufthavnen som følge af de store variationer i meteorologien fra uge til uge. Denne vurdering er blandt andet baseret på, at Test 2 ligger højere end Test 1.



Figur 3.2. Ugemiddelværdier fra kl. 7:00 til 20:00 for NO_x (NO+NO₂) og antallet af partikler ved Station B4 efter korrektion for baggrunds niveauerne. Korrektionen foretages ved at trække koncentrationerne ved Station Vest fra Station B4. De lodrette linjer angiver de tre test perioder. M1 og M1, J4, L2 angiver perioderne hvor de nævnte opstartspositioner ikke anvendes. EI viser perioden, hvor handling ved B4 udelukkende foretages med elgrej.

3.6 Simple forsøg med sporing af kilder

Den 7. december 2010 blev der sammen med København Lufthavne A/S gennemført et simpelt forsøg med direkte sporing af kilderne til det store antal små partikler. Sporing af kilderne blev foretaget ved at sammenholde ændringer i de målte koncentrationer med direkte observationer af aktiviteterne på forpladsen ved Station B4. Endvidere anvendtes et simpelt håndholdt instrument til måling af partikelantal. Dele af resultaterne fremgår af Figur 3.3. Der ses en tydelig kobling mellem aktiviteterne og de målte koncentrationer. Konklusionen på det simple forsøg er, at diverse køretøjer (handling, snerydning m.m), hovedmotorer og APU alle bidrager i væsentlig grad til de målte partikelkoncentrationer. Endvidere viste målingerne, at elgrej som forventet ikke bidrager med direkte udstødning af partikler.



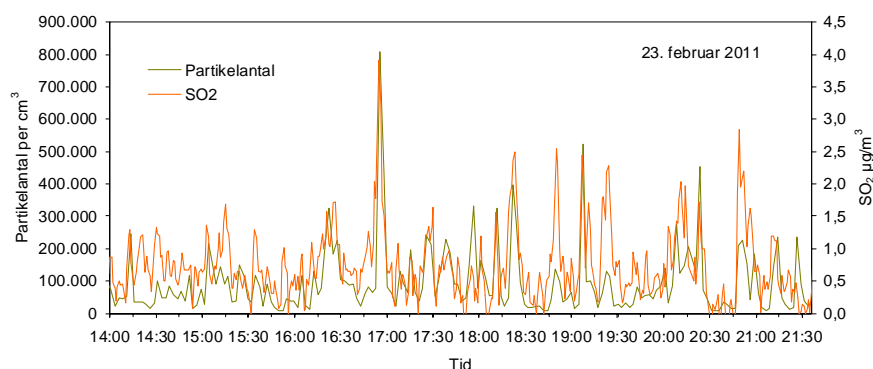
Figur 3.3. Antallet af partikler og koncentrationerne af NO ved Station B4 den 7. december 2010. NO udledes direkte fra forbrænding. Hovedparten af de større spidsværdier kan henregnes til aktiviteter i nærheden af målestationen. For at illustrere dette vises eksempler på spidsværdier, som kan henføres til specifikke aktiviteter.

3.7 SO₂-kampagnen

I februar-marts 2011 blev der gennemført målinger af SO₂-koncentrationer ved Station B4. Målingerne viste, at koncentrationerne er lave (omkring 1 µg/m³) set i forhold til EU-grænseværdierne, og at de ligger lidt under niveauet på HCAB.

Formålet med SO₂-målingerne er primært, at undersøge om svovl spiller en rolle i forbindelse med det store antal partikler. Litteraturundersøgelser peger på denne kobling mellem svovl og det store antal partikler. Flybrændstof indeholder relativt set store mængder svovl (940 ppm i Kastrup) set i forhold til dieselkøretøjer (10 ppm). Ved forbrænding omdannes svovl i brændstof hovedsageligt til SO₂ og i mindre grad til sulfatpartikler.

SO₂ anvendes i denne sammenhæng som tracer for sulfatpartiklerne, da det er svært at måle sulfatpartiklerne direkte. Målingerne af SO₂ viser (Figur 3.4), at der er et vist tidsmæssigt sammenfald mellem høje koncentrationer af SO₂ og antallet af partikler. Dette indikerer, at det høje antal små partikler delvis består af sulfatpartikler. Da der er betydeligt mere svovl i jetfuel end i dieselbrændstof formodes fly at være hovedkilden til sulfatpartiklerne.



Figur 3.4. Koncentrationer af SO₂ og antallet af partikler målt den 23. februar 2011 ved Station B4.

3.8 Luftforureningen med organiske komponenter

I perioden 20.10.2010 – 17.11.2010 blev der opsamlet luft- og filterprøver ved Station B4, til bestemmelse af koncentrationerne af flygtige organiske forbindelser (VOC), inklusiv aldehyder. Herudover blev der bestemt koncentrationer af partikelbundet elementært kulstof (EC; også benævnt sod) og organisk kulstof (OC) samt partikelbundne polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) i PM_{2,5} partikelfractionen. Måleresultaterne er præsenteret i Tabellerne 3.4-3.7.

3.8.1 Flygtige organiske stoffer (VOC)

VOC omfatter flygtige organiske stoffer fra naturlige kilder samt fra menneskelig aktivitet. Flere VOC stammer fra begge kilder, eksempelvis benzen, der er kræftfremkaldende og er reguleret af EU med en grænseværdi på 5 µg/m³ (EU, 2008). I forbindelse med den nationale overvågning af luftkvalitet (Ellermann et al., 2011) måles benzen og 16 andre VOC på bybaggrundsmålestationen på HCØ i København, idet de udgør en potentiel kilde til dannelse af ozon (O₃). De 17 VOC og yderligere 7 VOC er målt under den organiske målekampagne i lufthavnen i efteråret 2010 og er sammenlignet med koncentrationen i bybaggrundsluft i Tabel 3.4.

Tabel 3.4. Middelkoncentrationer ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) for udvalgte flygtige organiske stoffer (VOC) målt ved Station B4 i perioden 20.10.2010 – 17.11.2010. Til sammenligning præsenteres også resultater fra bybaggrund i København (HCØ). VOC angivet med fed skrift er målt i højere koncentration ved Station B4 end i bybaggrund. VOC angivet "jetfuel oa." vides at være repræsentative for jetfuel, men har også andre kilder (Aviation fuel technical review, 2006, Sorokin and Arnold, 2006).

Flygtige organiske stoffer (VOC)	Københavns Lufthavn (B4)	Bybaggrund (HCØ)
1-penten	0,05	0,04
n-pentan	0,39	0,51
trans-2-penten	0,02	0,04
Isopren (jetfuel oa.)	0,03	0,03
2-methylpentan	0,27	0,33
n-hexan	0,21	0,20
Benzen (jetfuel oa.)	0,57	0,71
n-heptan	0,19	0,25
2,2,2-trimethylpentan (isooctan)	0,05	0,08
toluen (jetfuel oa.)	1,28	1,71
n-octan (jetfuel oa.)	0,23	0,04
ethylbenzen (jetfuel oa.)	0,34	0,28
m,p-xylen (jetfuel oa.)	0,48	0,41
o-xylen (jetfuel oa.)	0,38	0,30
1,3,5-trimethylbenzen	0,13	0,07
1,2,4-trimethylbenzen	0,59	0,26
1,2,3-trimethylbenzen	0,18	0,06
Øvrige VOC målt i Københavns lufthavn (gate B4)		
Methylcyclohexan	0,25	-
ethylcyclohexan (jetfuel oa.)	0,14	-
n-nonan	0,41	-
n-tridecan	0,04	-
n-tetradecan	0,08	-
n-pentadecan	,07	-
n-hexadecan (jetfuel oa.)	0,04	-
VOC sum ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	5,4	5,3
Øvrige VOC ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1,0	

Det ses i Tabel 3.4, at 7 stoffer forekommer i højere koncentration ved Station B4, end i Københavns bybaggrundsluft, hvoraf n-octan, ethylbenzen, o-xylen og p-xylen vides at være repræsentative for jetfuel (Aviation fuel technical review, 2006; Sorokin og Arnold, 2006). Det skal dog bemærkes, at både anvendelsen af jetfuel og benzin er kilder til flere af VOC for eksempel benzen, ethylbenzen, toluen samt isomererne af trimethylbenzen (Kuykendall et al., 2009). Øvrige repræsentative VOC for jetfuel, der ikke måles rutinemæssigt i bybaggrund er ethylcyclohexan og n-hexadecan. Gennemsnitskoncentrationen for VOC, der rutinemæssigt måles i Københavns bybaggrundsluft, var $5,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i målekampagnen og dermed sammenlignelige med niveauet i Københavns Lufthavn på $5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

3.8.2 Aldehyder

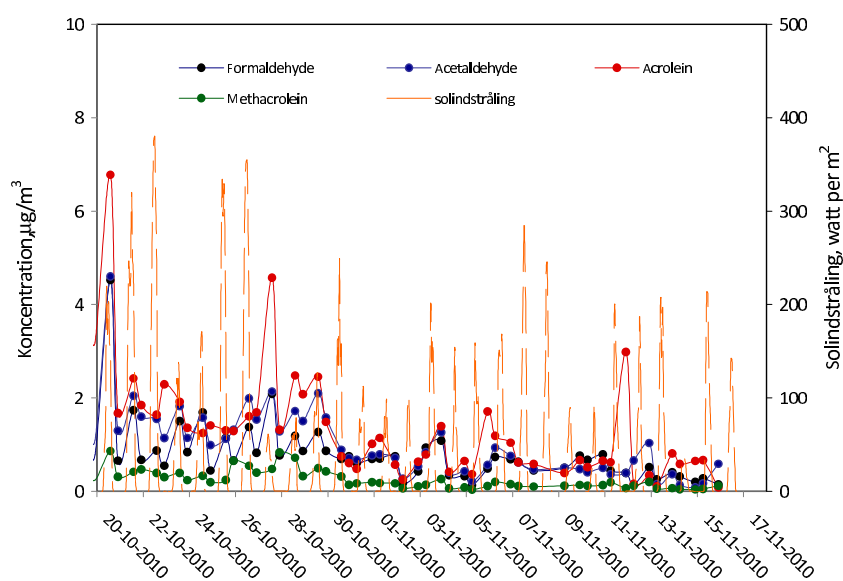
Ved Station B4 er der i kampagneperioden fundet 9 flygtige aldehyder, der er kendt fra andre studier af fly-emissioner (Brasseur et al., 1998; Sorokin and Arnold, 2006) (Tabel 3.5). Benzin- og dieseldrevne køretøjer er ligeledes kilder til aldehyder (Kuykendall et al., 2009).

Tabel 3.5. Maksimum-, minimum- og middelværdi (µg/m³) for udvalgte flygtige organiske aldehyder målt ved Station B4 i målekampagnen fra 20.10.2010 – 17.11.2010 (8 timers middelværdier).

Aldehyd	maksimum	minimum	Middel
Formaldehyd	4,5	0,13	0,82
Acetaldehyd	4,6	0,08	1,1
Acrolein	6,8	0,08	1,4
Propanal	0,9	0,04	0,27
Methacrolein	4,6	0,08	0,63
Butanal	0,9	0,05	0,24
Benzaldehyd	0,9	0,01	0,12
Pentanal	0,4	0,01	0,07
Hexanal	0,7	0,01	0,1

For flere af stofferne ses et aftagende niveau hen gennem målekampagnen (Figur 3.5). En mulig forklaring på dette fald kan være faldet i solindstrålingen i løbet af måleperioden, som også fremgår af figuren. Fald i solindstrålingen giver fald i de fotokemiske atmosfæriske reaktioner, som kan omdanne VOC'er fra bl.a. flybrændstof til aldehyderne angivet i Tabel 3.5 (Sorokin and Arnold, 2006). Flere andre meteorologiske parametre har dog også betydning for dannelsen af aldehyder. Endvidere findes også direkte udledninger af aldehyderne til atmosfæren. Dels er der en række naturlige kilder og dels forekommer de fleste af aldehyderne også direkte i udstødningen fra flymotorer (Brasseur et al., 1998; Sorokin and Arnold, 2006).

Aldehydkoncentrationerne ligger gennemsnitligt på 0,1-1,4 µg/m³ i måleperioden, hvorimod enkeltmålinger op til 6,8 og 4,6 µg/m³ er blevet målt for henholdsvis acrolein og methacrolein. Prøverne er opsamlet over 8 timer og repræsenterer en middelværdi for dette tidsinterval. Der vil derfor kunne forekomme højere koncentrationer i kortere tidsinterval end de 8 timer.



Figur 3.5. Udvalgte flygtige organiske aldehyder samt solindstråling (højre akse).

Eksponering for acrolein og methacrolein kan give anledning til irritation, eksempelvis næse-, hals- og øjenirritation (referencer i Woodruff et al., 2007). For eksempel er der observeret nedsat respirationsrate, øjen- og næseirritation efter eksponering for stigende koncentrationer af acrolein i 40 min (Weber-Tschopp et al., 1977). Forfatterne foreslog en tærskelværdi for negative helbredseffekter på 200-700 µg/m³. I et tidligere forsøg (Darley et al., 1960) er der rapporteret øjenirritation efter eksponering i 5 min ved koncentrationer ned til 140 µg/m³ (laveste koncentration for observerbare negative effekter, LOAEL). De målte koncentrationer på lufthavnen ligger betydeligt under disse niveauer.

3.8.3 Elementært og organisk kulstof i PM_{2,5} partikelfractionen

I målekampagnen ved Station B4 målt indholdet af kulstof i partikler (PM_{2,5}) i form af organisk kulstof (OC) og elementært kulstof (EC), hvor sidstnævnte kan sidestilles med "sod". Disse komponenter måles også rutinemæssigt i forbindelse med Delprogram for luft under NOVANA (Ellermann et al., 2011). I Tabel 3.6 sammenlignes OC, EC samt sodandelen af den totale partikulære kulstofmasse med tilsvarende resultater fra landlig baggrund (Risø) og trafikeret gade (HCAB). Det ses af Tabel 3.6, at OC ved Station B4 er sammenlignelig med niveauet for den trafikerede gade, hvorimod sod (EC) og sodandelen ligger mellem de to yderpunkter, dog tættest på landlig baggrund. Disse resultater indikerer, at der i lufthavnen eller i området omkring lufthavnen må være en kilde til OC.

Tabel 3.6. Døgnmiddelkoncentrationer (µg/m³) for elementært- (EC), organisk- (OC) og total kulstof (TC), samt kulstofandelen af EC (EC/TC). Måleværdier for landlig baggrund og trafikeret gade er medtaget for samme måleperiode til sammenligning.

Lokalitet	OC	EC	TC	EC/TC
Station B4	2,7	1,2	3,8	0,31
HCAB	2,6	2,6	5,2	0,51
Landlig baggrund (Risø)	1,2	0,4	1,6	0,25

3.8.4 Polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) i PM_{2,5} partikelfractionen

I Tabel 3.7 vises resultaterne fra måling af ni partikelbundne PAH'er, herunder benzo(a)pyren, og deres gennemsnitskoncentration under målekampagnen ved Station B4 (20.10.2010 – 17.11.2010) sammen med resultater fra HCAB. Koncentrationerne ved Station B4 udgør ca. en tredjedel af de tilsvarende på HCAB.

Tabel 3.7. Middelkoncentrationer (ng/m³) for udvalgte partikelbundne PAH'er ved gate B4 sammenlignet med HCAB i samme måleperiode. Endvidere vises data fra forpladsen på Leonardo Da Vinci Lufthavn i Rom fra januar-februar 2005 (Cavallo et al., 2006)

PAH (ng/m ³)	Københavns lufthavn (B4)	Trafikeret gade (HCAB)	Cavallo et al., 2006
Chrysen	0,18	0,51	1,1
benzo(a)anthracen	0,10	0,33	1,5
Dibenzo(a,h)anthracen	0,02	0,07	0,0
benzo(g,h,i)perylene	0,17	0,64	1,9
Indenopyren	0,17	0,53	1,7
benzo(e)pyren	0,13	0,38	0,5
benzo(a)pyren	0,12	0,34	0,4
benzo(b+j+k)fluoranthen	0,44	1,15	3,1
Perylen	0,02	0,06	0,0

Der er tidligere publiceret et italiensk målestudie fra forpladsen ved Leonardo Da Vinci Lufthavn i Rom (Cavallo et al., 2006), hvor bl.a. flygtige og partikelbundne PAH'er er opgjort over 5 arbejdsdage. I det omtalte studie blev der observeret betydeligt højere koncentrationer af de fleste PAH'er end målt på forpladsen ved Københavns Lufthavn. Bemærk dog, at de to studier ikke er helt sammenlignelige, da den italienske undersøgelse dækkede en kortere måleperiode og blev udført på en anden årstid.

PAH'en benzo(a)pyren er kræftfremkaldende og reguleret af EU med en målværdi (slags grænseværdi) i luft på 1 ng/m³ (EU, 2008). Denne målværdi er ikke overskredet ved Station B4. En række af PAH'erne er klassificeret som sandsynlige kræftfremkaldende stoffer for mennesker af det amerikanske EPA (Environmental Protection Agency): benzo(a)anthracen, benzo(b)fluoranthen, benzo(k)fluoranthen, chrysen, dibenzo(a,h)anthracen samt indenopyren. Koncentrationerne for alle disse PAH'er er lavere i Københavns Lufthavn end på HCAB.

3.9 Delkonklusion for målinger

Hovedparten af de målte luftforureningskomponenter på forpladsen ligger på eller under de niveauer, som måles på HCAB. Endvidere overholdes grænseværdier eller målværdier for luftkvalitet for alle de luftforureningskomponenter, hvor der eksisterer målsætninger.

Antallet af ultrafine partikler er den væsentligste afvigelse fra dette billede, da koncentrationen målt på forpladsen ligger omkring tre gange højere end på HCAB. Der eksisterer ingen luftkvalitetsgrænseværdier for antallet af ultrafine partikler.

Måling af SO₂ ved Station B4 indikerer, at det relativt høje svovlindhold i jetfuel er medvirkende til det høje partikelantal på forpladsen. Dette underbygges af litteraturundersøgelser.

I målekampagnen fra den. 20. oktober til 17. november 2010 blev der opsamlet og målt flygtige og partikulære organiske stoffer på forpladsen i Københavns lufthavn ved gate B4. VOC er i Kastrup Lufthavn målt til at være på niveau med bybaggrundsluft, dog ses forhøjede koncentrationer af repræsentative VOC for jetfuel, hvilket er mest tydeligt for n-octan. De tre isomere af trimethylbenzen er ligeledes en anelse forhøjede ift. bybaggrund. Aldehyder, herunder acrolein, der kan give anledning til sensorisk irritation, ligger generelt betragteligt under effektniveauerne.

Imidlertid forekommer enkeltmålinger på op til $6,8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, opsamlet med midlingstid over 8 timer. Højere koncentrationer kan derfor forekomme i kortere tidsrum.

Ved Station B4 måles et niveau af OC i partikelfractionen ($\text{PM}_{2,5}$), der er sammenlignelig med niveauet for stærkt trafikerede gader i København (HCAB), mens EC (svarende til sod) og andelen af EC i totalt partikulært kulstof (EC/TC) ligger på et niveau mellem landlig baggrundsluft og trafikeret gade. Der er derfor et markant bidrag til OC i forbindelse med Københavns Lufthavn. Dette bidrag er ikke identificeret.

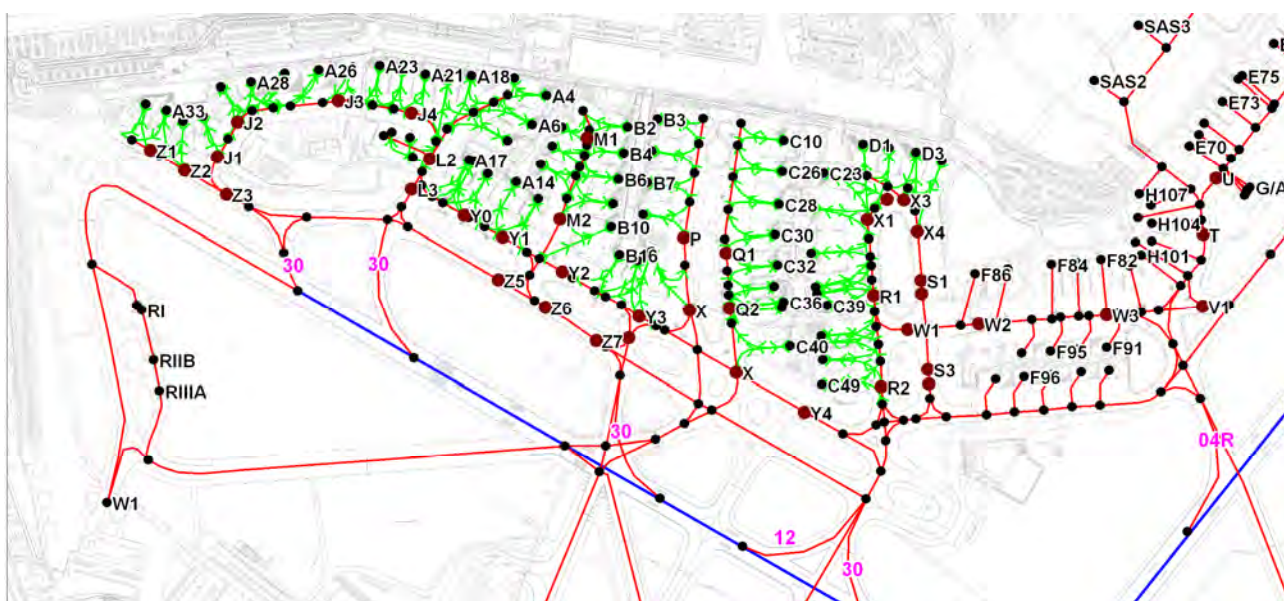
Udvalgte partikelbundne PAH'er på forpladsen ved Station B4 er sammenlignet med måleresultater fra HCAB i København og Leonardo Da Vinci lufthavnen i Rom. De udvalgte PAH udgør ca. en tredjedel af koncentrationen på HCAB i samme periode, og fra 6-31 % af koncentrationerne målt på Leonardo Da Vinci Lufthavn i Rom (Cavallo et al., 2006), på nær perylen og dibenzo(a,h)anthracen, der forekommer i meget lave koncentrationer i Rom.

Blandt de nævnte stoffer er det kun benzen og benzo[a]pyren, som er reguleret via EU's luftkvalitetsdirektiver (EU, 2005 og 2008). Koncentrationerne af disse stoffer i Københavns Lufthavn overskrider i målekampagnen ikke grænseværdien for benzen ($5 \mu\text{g}/\text{m}^3$) og målværdien for benzo[a]pyren ($1 \text{ ng}/\text{m}^3$).

Yderligere detaljer om målingerne kan findes i Bilag 1.

4 Emissionsopgørelser for forpladsen

Figur 4.1 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.



Figur 4.1. Detaljeret kort over forpladsen med angivelse af standpladser, opstartsmærker, rulleveje (rød) og et udsnit af start og landingsbaner (blå). Kortet beskrives i flere detaljer i afsnit 4.2.

4.1 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, registrerings-nummer, flyoperatør, standplads, off/on block tid, start/landing angivelse, tidspunkt for start/landing og bane.

Brug af Auxiliary Power Unit

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 4.1. Den samlede før off-block APU tid opdeles i "APU start up" og "Boarding", der svarer til forskellige motorbelastninger.

Tabel 4.1. 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 efter on-block og 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 $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ og over $25\text{ }^{\circ}\text{C}$. 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 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 ($1,5\text{ m/s}$) langs de grønne linjer hen til det første opstartsmærke, hvor flyene starter hovedmotorerne (Figur 4.1).

Brug af handlingskøretøjer

Handlingsselskaberne i Københavns Lufthavn har til brug for projektet opstillet et skema (Tabel 4.2) med de anvendte grejtyper, tidsrum og gennemsnitlig motorbelastning for handlingskøretøjerne, der benyttes ved flyhandling i lufthavnen. Handlingskemaet er opdelt i overordnede flygrupper med bogstavbetegnelserne B-E for de flytyper, der indgår i projektets operationsdata. Handlingskemaet er opdelt i overordnede flygrupper med bogstavbetegnelserne B-E, fra de mindste jetfly 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 brændstofpåfyldning foretages efter landing. Der benyttes tankvogn til brændstofpåfyldning 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 ($1,5\text{ m/s}$). 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 handlingsselskaberne med angivelse af grejtypenummer, brændstofftype, motorstørrelse og årgang/motornorm.

Tabel 4.2. Liste over anvendte handlingsudstyr, længde af handlingsperiode, tiden handlingsudstyret anvendes (grejtid) og belastningsgraden for handlingsudstyret. Baseret på information fra handlingsselskaberne i Københavns Lufthavn. Listen er opdelt for landing (øverst) og start (nederst)

	Flygruppe				
	B	C	D	E	Alle
Handlingsperiode (min) →	15	20	30	40	
Landing		Grejtid (min)			Lastfaktor
Bagage tractor	9	10	15	25	0,15
Bagagebånd	10	20	20	20	0,15
Push-back at gate	0	0	0	0	0,15
Push-back moving	0	0	0	0	0,75
Container loader	0	15	27,5	35	0,45
Container transportør	0	15	27,5	35	0,35
Fuel (dispenser truck)	10	15	30	50 ^a	0,1
Fuel (refueling truck)	10	15	30	50 ^a	0,1
Cleaning highloader	0	0	10	15	0,45
Cargo/Post tractor	0	5	5	5	0,15
Toiletbil	0	0	0	0	0,25
Catering B/C/D/E	1	3	5	5	0,1/0,2/0,22/0,22
Vandbil	0	0	0	0	0,25
Handlingsperiode (min) →	15	20	30	40	
Start		Grejtid (min)			Lastfaktor
Bagage tractor	9	10	15	25	0,15
Bagagebånd	10	20	20	20	0,15
Push-back at gate	10	10	10	10	0,15
Push-back moving	0	0	0	0	0,75
Container loader	0	15	27,5	35	0,45
Container transportør	0	15	27,5	35	0,35
Fuel (dispenser truck)	0	0	0	0	0,1
Fuel (refueling truck)	0	0	0	0	0,1
Cleaning highloader	0	0	10	15	0,45
Cargo/Post tractor	0	5	5	5	0,15
Toiletbil	0	10	20	20	0,25
Catering B/C/D/E	0	0	0	0	0,1/0,2/0,22/0,22
Vandbil	0	7,5	15	15	0,25

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

4.2 Digitalisering af aktivitetsdata

Flybevægelser

Figur 4.1 viser et udsnit af det kort, der bruges over hele lufthavnen. Alle standpladser er 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. Fra hver standplads er der tegnet en rute, der fører hen til et fælles start/slutpunkt for passende grupper af standpladsers videre taxitur ad præferencerulleveje til/fra start/landingsbanerne. Ved digitaliseringen er der brugt et gitternet på 5x5 m som basis for de videre spredningsberegninger.

Digitaliseringen af flybevægelserne inddeles i faserne taxi før start, taxi kø, start, stigning, indflyvning, landing, taxi efter landing (Tabel 4.3). 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 og stignings- og landingsvinkler er brugt til at fastlægge tidsforløbet og opholdet i de enkelte beregningsceller.

Tabel 4.3. Faserne anvendt ved digitaliseringen af flybevægelserne

Operationstype
Taxi ankomst (taxi way)
Taxi afgang (taxi way)
Taxi afgang (queing)
APU ankomst
Landing (runway deceleration)
Landing (runway taxi)
Take off (runway)
Landing (descent)
Take off (climb out)
APU opstart
APU boarding
APU hovedmotorstart
Push-back moving
Hovedmotor ved motorstart
Handling ankomst
Handling afgang
APU ved push-back
Hovedmotor ved 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 vinge-længde.

4.3 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).

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.

APU og opstart af hovedmotorer

Emissionsfaktorer angivet i kg/h for APU motorer 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.

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 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 bagage-traktorer har en motorteknologi på niveau med benzinbiler fra 1970'erne, mens de nyeste traktorer motorteknologi svarer til de ældste benzinbiler udstyret med trevejskatalysator (Robert Hagen, SGS, personlig kommunikation 2010).

4.4 Beregningsmetode

Ud fra emissionsfaktorerne beskrevet i afsnit 4 kan emissionsrater (g/s) afledes for hovedmotorer, APU, motoropstart og handlingsgrej. For hver celle i et beregningsgitter med en opløsning på 5 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

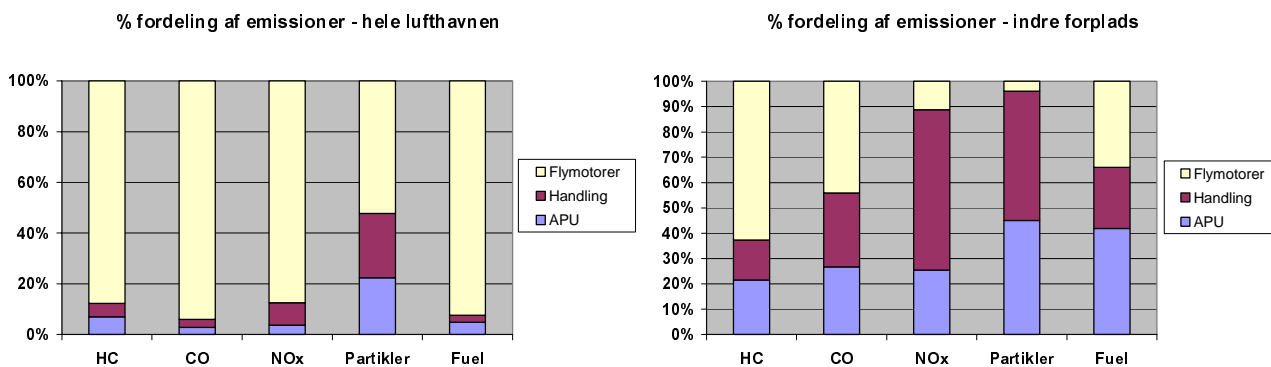
4.4.1 Resultater

Figur 4.2 viser de samlede emissioner per døgn af partikler 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 4.2. De samlede emissioner af partikler og NO_x på forpladsen. Gennemsnitligt døgn.

De beregnede emissionsniveauer kan generelt forklares ud fra størrelsen af de brændstofrelaterede emissionsfaktorer og de beregnede energiforbrug. På Figur 4.3 vises procentfordelingen af emissioner fra handling, APU og flymotorer fra hele lufthavnen og for et mere begrænset område af forpladsen ("indre forplads"; Figur 4.4). De beregnede emissionsniveauer kan generelt forklares ud fra størrelsen af de brændstofrelaterede 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 brændstofrelaterede emissionsfaktorer for de dieseldrevne handlingskøretøjer. For APU opvejes de noget mindre brændstofrelaterede emissionsfaktorer af et væsentligt større samlet energiforbrug. For hovedmotorerne er udledningerne af NO_x og især partikelmasse små på forpladsen pga. de meget små brændstofrelaterede emissionsfaktorer ved lav motorbelastning. Omvendt udleder hovedmotorerne store mængder kulbrinter (HC) og kulmonoxid (CO) under taxifart 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.

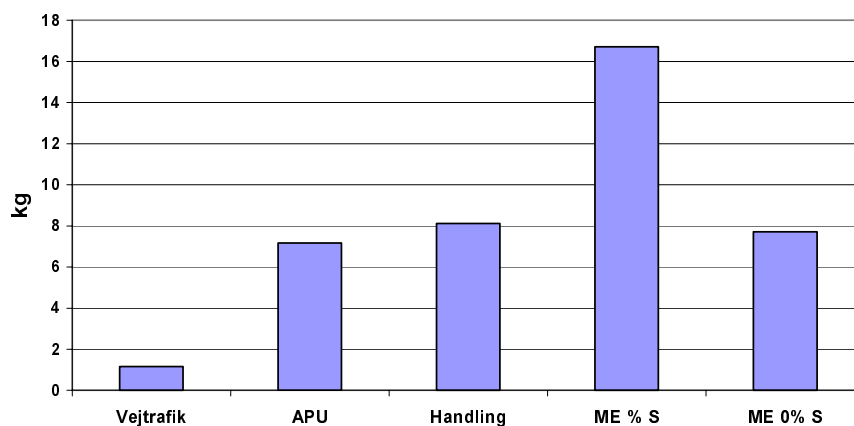


Figur 4.3. Den procentvise fordeling af emissionerne på hele lufthavnen (venstre) og den indre forplads. HC står for kulbrinter.



Figur 4.4. Det begrænsede område af forpladsen kaldet den indre forplads.

Figur 4.5 viser partikelemissionen 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 partikelemissionsfaktorer, 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 4.5, at emissionsbidraget fra den kørende trafik er meget lille.



Figur 4.5. 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).

4.5 Delkonklusion

Emissionsopgørelsen for lufthavnen indeholder brændstofforbrug og emissioner fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpemotorer (APU), handlingsudstyr 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 handlingselskabernes detaljerede opgørelse af bestanden af handlingsudstyr og tidsrum for grejanvendelse. Ud fra internationale databaser er emissionsfaktorer beregnet for hvert enkelt fly, og for handlingsudstyret 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 brændstoffrelaterede 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 brændstoffrelaterede emissionsfaktorer for de dieseldrevne handlingskøretøjer.
- APU udgør den næststørste andel af de samlede udledninger af NO_x og partikler på forpladsen. De brændstoffrelaterede emissionsfaktorer er noget 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 forpladsområdet pga. de meget små brændstoffrelaterede emissionsfaktorer ved lav motorbelastning.

- Hovedmotorerne udgør den største andel af udledningerne af HC og CO på forpladsen grundet store emissionsfaktorer under taxifart og ved motoropstart pga. den dårlige motorforbrænding ved disse driftsbetingelser.
- Hovedmotorerne udgør den største andel af udledningerne for NO_x, partikelmasse, HC og CO når man betragter hele lufthavnen. Dette skyldes det store brændstofforbrug ved take off. For NO_x er de høje forbrændingstemperaturer ved take off også en af grundene til de store udledninger fra hovedmotorerne.
- Samlet set for lufthavnen er emissionsandelene fra den vejgående trafik små og beregnes for NO_x, partikelmasse, HC og CO at være hhv. 1,6 %, 3,5 %, 0,8 % og 0,9 %. Emissionsandelene fra den vejgående trafik forventes at være meget mindre på forpladsen.

Emissionsopgørelsen viser, at over 50% af den udledte partikelmasse fra hovedmotorerne stammer fra svovlindholdet i jetfuel, som ifølge oplysninger fra lufthavnens brændstoflager udgør omkring 940 ppm. Forbrændingen af svovl i jetfuel fører til dannelse af sulfatholdige partikler. For APU forventes ligeledes, at en relativt stor andel af den udledte partikelmasse skyldes svovl i jetfuel.

Yderligere detaljer om emissionsopgørelsen kan findes i Bilag 2.

5 Modelberegninger for området omkring forpladsen

Bidraget til luftkoncentrationerne af NO, NO₂ og PM_{2,5} på forpladsen er beregnet i tre trin ved hjælp af tre forskellige luftforureningsmodeller, som trinvist zoomer ind på detaljerne på forpladsen:

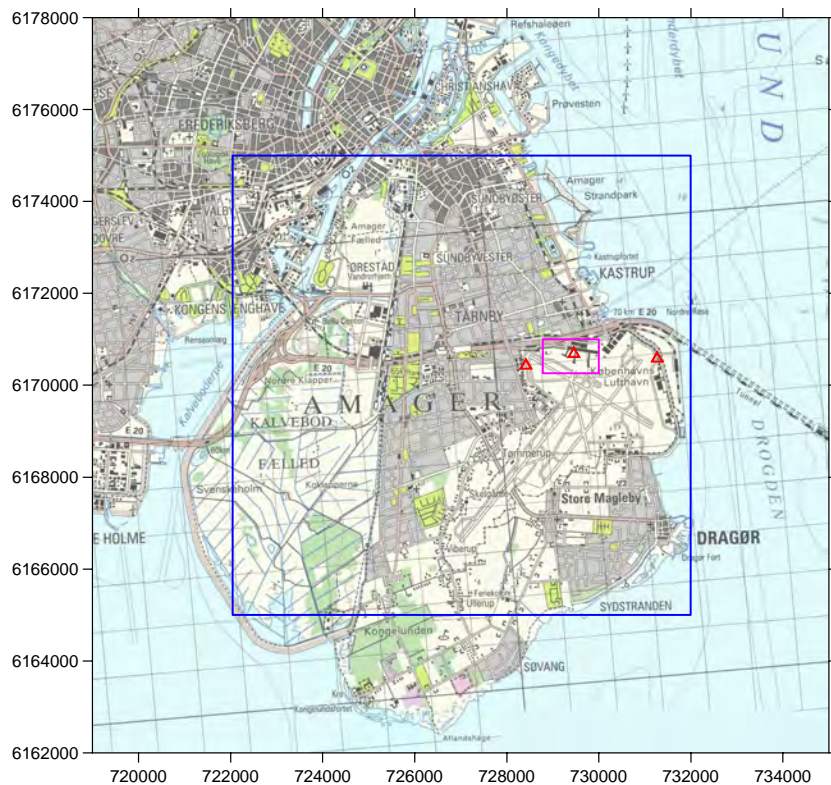
- På trin 1 anvendes den hemisfæriske model kaldet DEHM, som omfatter hele den nordlige hemisfære. Modellen har en geografisk opløsning på 5,6 km x 5,6 km for Danmark. Modellen anvendes rutinemæssigt i forbindelse med den nationale luftkvalitets-overvågning. Yderligere detaljer omkring modellen kan findes i Ellermann et al. (2011). Resultaterne fra trin 1 anvendes til modelberegningerne på trin 2.
- På trin 2 anvendes mellemskalamodellen kaldet OML, som har en geografisk opløsning på ned til 50 m x 50 m. Resultaterne fra trin 2 anvendes til modelberegningerne på trin 3.
- På trin 3 anvendes den mest detaljerede model kaldet MISKAM, som har en geografisk opløsning på ned til 5 m x 5 m for den inderste del af forpladsen. Modellen er en såkaldt "computational fluid dynamics model", som kan beregne luftens strømninger omkring bygningerne på forpladsen. Resultaterne fra disse beregninger er derfor de mest nøjagtige.

Dette kapitel beskriver resultaterne fra beregningerne på de to første trin, dog med størst fokus på trin 2. I Kapitel 6 beskrives resultaterne fra beregningerne på trin 3.

5.1 Metode

Spredningsberegningerne og emissionsopgørelserne er opdelt i to områder: Et område på 10 km x 10 km som dækker hele Kastrup Lufthavn, det meste af Amager og dele af København (det såkaldte OML-domæne) samt området udenfor dette (DEHM-domænet). I OML-domænet anvendes lokalskala spredningsmodellen OML med emissioner i en relativ fin opløsning på 50 m x 50 m, 250 m x 250 m og 1 km x 1 km. Uden for området anvendes regionalskalamodellen DEHM med en grovere opløsning på 5,6 km x 5,6 km i Danmark og 50 km x 50 km i udlandet.

DEHM beregner et baggrundsbidrag til OML, der igen beregner et baggrundsbidrag til et udsnit af forpladsen på 750 m x 1250 m (MISKAM-domænet) uden at inddrage emissionen fra dette område. Disse koncentrationer indgår som baggrund i den detaljerede beregning for forpladsen med MISKAM modellen. Figur 5.1 viser de forskellige model-domæner. Resultater af OML-beregninger, hvor MISKAM ikke indgår, inddrager selvfølgelig alle emissioner inklusive dem fra MISKAM-domænet.



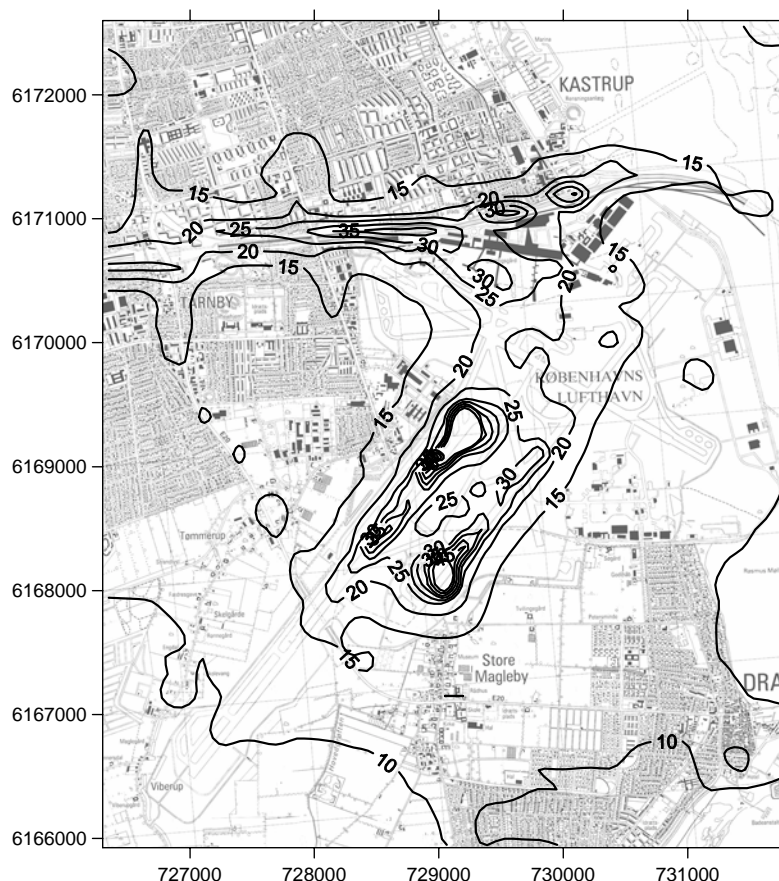
Figur 5.1 Kort med de anvendte modellers beregningsdomæner. Blå ramme viser OML-domænet på 10 km x 10 km; udenfor anvendes DEHM. Den mindste ramme viser den del af forpladsen (750m x 1250m), hvor der er udført detaljerede beregninger med MISKAM. Målestationerne Vest, B4 og Øst er vist med røde trekanter.

OML anvender emissioner for lufthavnen opgjort for 4 typiske dage, hvor emissionen hovedsageligt er knyttet til anvendelse af enten bane 22 L+R, 04 L+R, 12 eller 30 (banernes placering kan ses på Figur 2.1). For hver dag er emissionen opgjort for hver time i 50 m x 50 m felter. Det er de meteorologiske forhold for hver enkelt time, der bestemmer hvilken bane der anvendes, og dermed hvilken emissionsdag, der benyttes som grundlag for beregningerne for timen. Med den benyttede meteorologi for 2010 er banerne 22, 04, 30 og 12 anvendt i henholdsvis 54 %, 44 %, 1,3 % og 0,3 % af timerne.

5.2 Overordnet fordeling af koncentrationer i lufthavnen og nærområdet

Den overordnede geografiske fordeling af årsmiddelværdier af NO_x , NO_2 og $\text{PM}_{2,5}$ for år 2010 er beregnet med OML for lufthavnen og nærområdet. Figur 5.2 viser årsmiddelværdien af NO_2 . Det grove beregningsnet (150 m mellem punkterne) gør det ikke muligt at se på detaljer i kurveforløbene.

Lokalt forhøjede koncentrationer ses på forpladsen. Der ses meget høje niveauer på bane 22 og 04, hvor flyene påbegynder take-off og holder i kø under vestlige henholdsvis østlige vindretninger. Koncentrationerne i den nordligste kant af kortet er generelt højere end i den sydligste kant, hvilket skyldes emissionerne fra København. Der ses et langstrakt lokalt område med relativt høje koncentrationer langs motorvejen lige nord for lufthavnen.



Figur 5.2. Overordnet geografisk fordeling af årsmiddelværdien af NO₂ (µg/m³). Spredningsberegninger med OML i gitternet på 150 m. Isokurver stopper ved 50 µg/m³.

Årsmiddelværdier for PM_{2,5} er vist i Figur 5.3. Variationen i koncentrationniveauerne er mindre end for NO₂, men det overordnede mønster ligner – dog har forpladsen relativt højere koncentrationer og området med take-off/kø har relativt lavere koncentrationer.

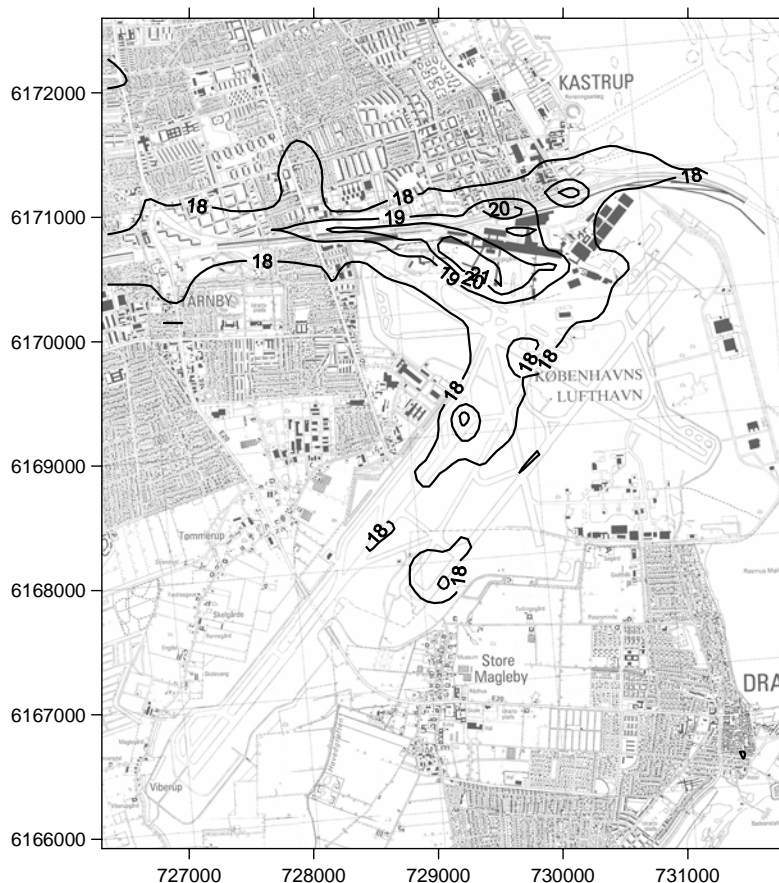
5.3 Stationerne B4, Øst og Vest

I OML-beregningerne er det muligt at medtage eller udelukke de forskellige emissioner, således at de forskellige kildetyper bidrag til de beregnede koncentrationer kan identificeres. I Figur 5.4 er vist en sammenligning af de målte og beregnede koncentrationer af NO_x, NO₂ og PM_{2,5} for Stationerne Vest, B4 og Øst. De beregnede koncentrationer er opdelt på kilderne: *Baggrund* (DEHM bidrag), *By* (bidrag fra OML-domænet 10x10 km²), *Trafik CPH* (trafik i lufthavnen), *Handling*, *APU* og *flymotor*.

For Station Vest stemmer målinger og beregninger af NO_x godt overens med respektive 21,3 µg/m³ og 20,6 µg/m³. Her udgør lufthavnens bidrag ca. 25 % af totalen ifølge beregningen.

For Station Øst undervurderer OML koncentrationen af NO_x med 32 %; 16,8 mod 24,8 µg/m³. Det kan skyldes, at enten er den anvendte emission fra den indre og ydre 'ringvej' øst for stationen er for lav, at der mangler en ukendt meget lokal kilde eller at punktet ligger relativt tæt på kanten af OML-domænet, hvilket kan give et modelproblem med baggrundsbidrag fra DEHM.

Beregningerne med OML for Station B4 kan ikke tage hensyn til de detaljerede og komplicerede strømninger tæt ved bygningerne, og som ventet kan OML ikke reproducere koncentrationsniveauet af NO_x ved Station B4. Her vil eventuelle fejl på bidrag fra handling og APU være dominerende, da kilderne ligger meget tæt på Station B4. Beregningen ligger 65% over målingen; 62 mod 38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Handling udgør her en relativ stor andel af den beregnede NO_x koncentration.

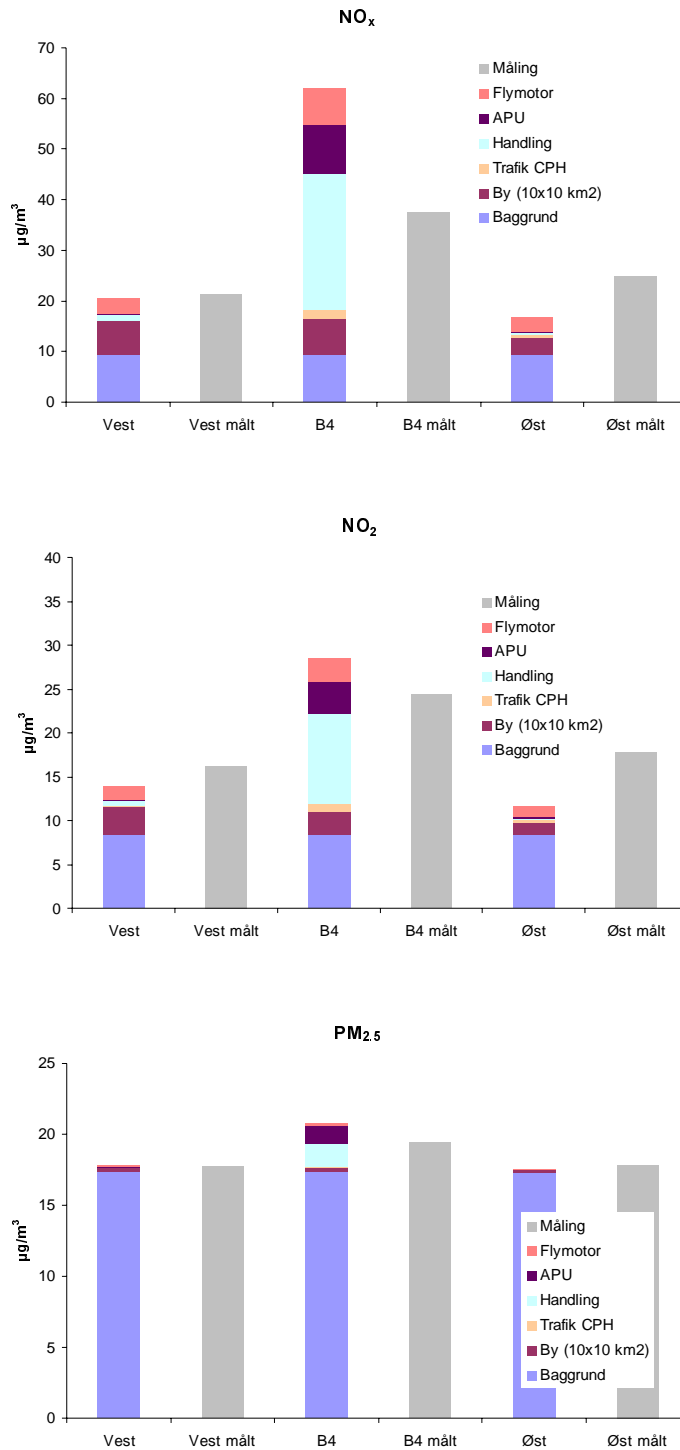


Figur 5.3. Overordnet geografisk fordeling af årsmiddelværdien af $\text{PM}_{2.5}$ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). Spredningsberegninger med OML i gitternet på 150 m.

Ved Station B4 er NO_2 beregnet til 29 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ mod målt 24 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, hvilket er i relativt bedre overensstemmelse end for NO_x , og skyldes at omdannelsen af NO til NO_2 er begrænset pga. en begrænset mængde ozon i baggrundsluften. For Station Vest passer resultatet godt med målingerne, mens det for Station Øst undervurderes noget.

For $\text{PM}_{2.5}$ er forholdene anderledes. For Station Vest og Øst måles og beregnes næsten ens niveauer på 17,6-17,8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Baggrundsbidraget udgør ca. 98 %. For Station B4 beregnes igen højere koncentrationer end målt; 21 mod 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. I forhold til Station Vest ligger Station B4 16 % højere for beregninger og 9 % højere for målinger.

Med forbehold for de komplicerede spredningsforhold ved Station B4 og den begrænsede pålidelighedsnøjagtighed af OML under disse forhold, viser dette, at de beregnede koncentrationer er noget overestimerede på forpladsen ved Station B4, men også generelt på forpladsen (Se Kapitel 6).



Figur 5.4. Sammenligning af målt og beregnede årsmiddelværdier ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) af NO_x , NO_2 og $\text{PM}_{2.5}$. For beregningerne er de forskellige kilders bidrag angivet.

5.4 Delkonklusion

Den geografiske fordeling af koncentrationer for hele lufthavnen beregnet med OML viser, at forpladsen er det sted i lufthavnen hvor personel er mest udsat for forhøjede niveauer af NO_x , NO_2 og $\text{PM}_{2.5}$.

De beregnede koncentrationer ved Station Vest stemmer godt overens med de målte niveauer for 2010. Beregnede koncentrationer for station

Øst er undervurderede. Koncentrationerne på forpladsen er estimeret en del for højt, hvilket detaljerede analyser har vist sandsynligvis skyldes anvendelse af for høje emissioner fra primært handling. Den relative geografiske variation af koncentrationen på forpladsen reproduceres godt (se Bilag 3).

Yderligere detaljer om modelberegningerne kan findes i Bilag 3.

6 Modelberegninger for selve forpladsen

Modelberegninger for selve forpladsen er i undersøgelsen blevet udført med en såkaldt CFD-model (Computational Fluid Dynamics). Modellen har meget høj geografisk opløsning (på få meter), og den kan derfor anvendes til at udføre detaljerede beregninger af luftens turbulens og strømning omkring bygningerne på forpladsen. Modellen kan derfor beregne den lokale spredning af luftforurening fra kilder på forpladsen under de lokale meteorologiske forhold. Resultaterne har fokus på luftforureningsniveauerne i forbindelse med handling af fly. Endvidere giver modelberegningerne en illustration af den horisontale variation af luftforureningen på forpladsen, således at eventuelle områder med høje koncentrationer kan identificeres.

6.1 Metode

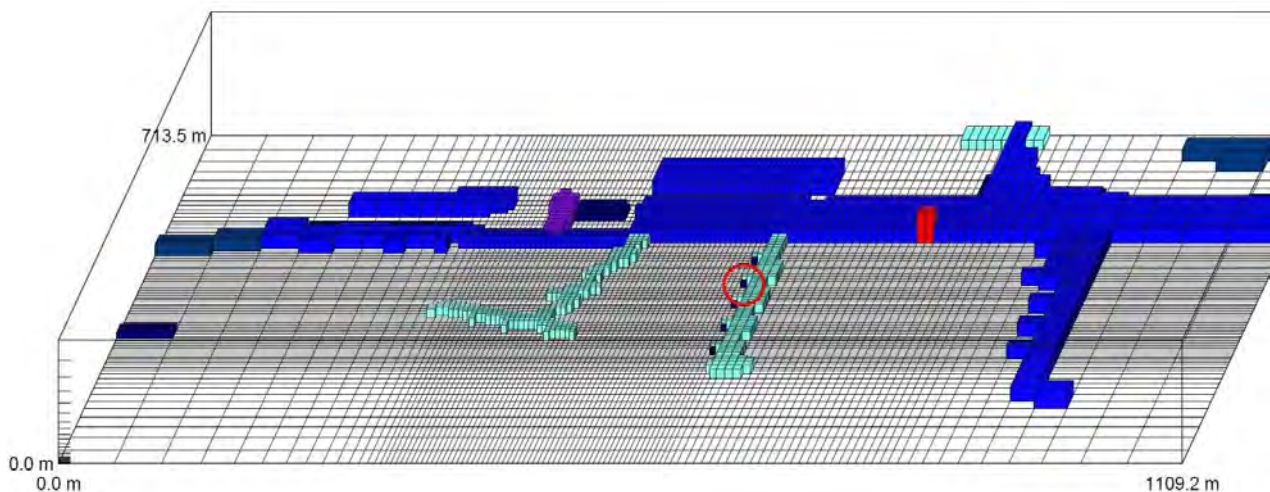
Lufthavnsbygningernes udformning påvirker de lokale meteorologiske forhold og dermed spredningen af luftforureningen på forpladsen. Derfor er der blevet anvendt en såkaldt CFD-model (Computational Fluid Dynamics), som er udviklet til at tage hensyn til de detaljerede komplekse luftstrømninger omkring bygninger.

Ved modelberegningerne har vi benyttet den seneste version (6.1) af den tyske CFD-model MISKAM (Eichhorn, 1996, Lohmeyer, 2011) som tidligere også blev anvendt af AU (Olesen et al. 2009). Ved brug af modellen er man underlagt en række modelmæssige begrænsninger, som man til dels kan imødegå ved passende tilrettelæggelse af modellens opsætning og input (f.eks. er beregningsgitterets tæthed af væsentlig betydning, og gitteret skal være rektangulært). Andre begrænsninger på modellen er, at man antager neutral stabilitet i atmosfæren, og at man ikke kan simulere at udstødning fra flymaskiner er varm. Mht. røgfaneløft vil modelberegningerne tage hensyn til disse forhold gennem den initiale spredning.

Figur 6.1 viser beregningsgitteret, der er blevet brugt ved dette projekt. Beregningsgitteret har en opløsning i centrum på 5 m x 5 m og gittercellerne bliver større ud mod randen af modelområdet. Bygningspolygoner samt højde af bygninger er leveret af Københavns Lufthavne A/S og blev projiceret over på gitteret i MISKAM.

Emissionerne er opdelt i fire kildegrupper (Flymotorer, APU, handling og vejtrafik på forpladsen). Placering af og tidsvariation for emissionerne er baseret på emissionsopgørelsen, som er beskrevet i Kapitel 4.

Baggrundskoncentrationer, som skyldes kilder udenfor MISKAM's beregningsområde, er blevet beregnet med OML i en modelkørsel, hvor man har slukket for alle kilder i et område svarende til MISKAM's gitter. Dette er for at undgå at medtage kilderne to gange (se Kapitel 5).



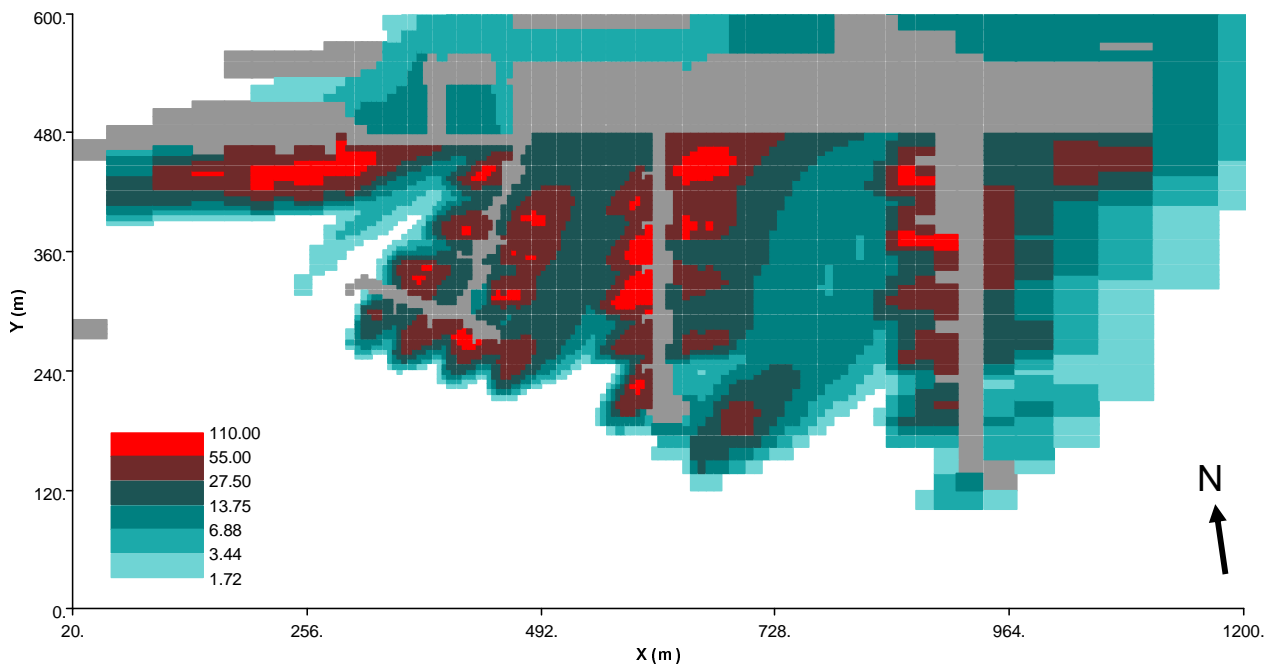
Figur 6.1. Beregningsgitter i MISKAM-modellen i en skrå 3D visualisering. Farver indikerer forskellige højde af bygninger i modellen. Den røde ring indikerer placering af Station B4.

MISKAM-modellen beregner i første omgang strømningsforhold på forpladsen for 36 forskellige vindretninger (0, 10, 20, ... 350 grader). De beregnede strømningsforhold (vindretning og vindhastighed) ved Station B4 blev sammenholdt med vindmålingerne foretaget med Sonicvindmåler i 2 meters højde. MISKAM kunne fint reproducere indflydelsen af bygninger på strømningerne ved Station B4 og viste god overensstemmelse med målingerne.

Derefter beregnes spredning af emissioner fra de fire kildegrupper, som bruges til at generere en tidsserie af koncentrationerne af NO_x og $\text{PM}_{2,5}$ i udvalgte punkter (f.eks. Station B4). Her indgår døgnvariation af emissioner baseret på emissionsopgørelsen, de aktuelle vindretninger og vindhastighed (samme antagelser som i OML-beregningerne) samt baggrundskoncentrationer med bidrag fra kilder udenfor MISKAM's område beregnet med OML.

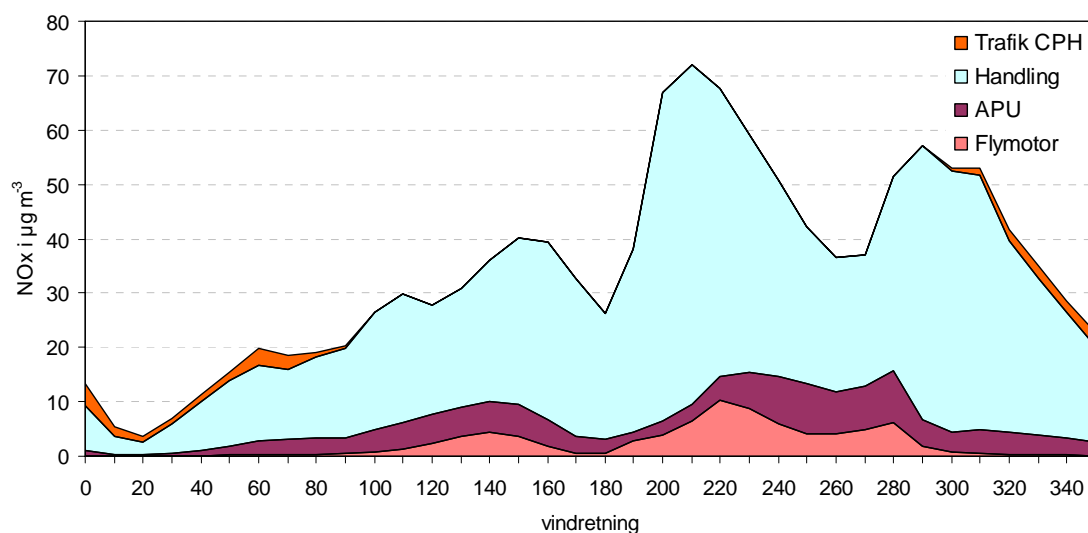
6.2 Resultater

Resultaterne fra CFD-modellen viser, hvordan emissioner fra forskellige steder på forpladsen vil sprede sig under hensyntagen til de komplekse vindstrømninger, der skabes af bygningerne i lufthavnen. Som eksempel viser Figur 6.2 de beregnede NO_x -koncentrationer på forpladsen, hvis kun emissionerne fra handling er taget i betragtning og for en vindretning på 240 grader. Det er tydeligt, at koncentrationer er forøget lokalt i de områder, hvor kilderne ligger og hurtigt aftager med afstanden til kilderne.



Figur 6.2. Koncentrationer af NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) på forpladsen for vindretning 240° . Kun NO_x -emissioner fra handling er taget i betragtning. Rød angiver de højeste koncentrationer. Pilen angiver nordlig retning.

Vindretningen har selvfølgelig en helt afgørende betydning for, hvilke kilder der bidrager til koncentrationerne på en udvalgt lokalitet. Figur 6.3 viser et eksempel for NO_x -koncentrationer beregnet ved Station B4 opdelt i de fire kildegrupper som funktion af vindretning. Det største bidrag til NO_x -koncentrationen kommer fra handling og især for sydlige vindretninger ($100\text{--}280^\circ$). Ved sydlige vindretninger bidrager APU og flymotorer omtrent ligeligt, mens trafik på forpladsen kun udgør et mindre bidrag. Bidrag fra trafik kommer som forventet mest fra nordlige retninger, hvor trafikklenderne er placeret.



Figur 6.3. NO_x -koncentration ved Station B4 beregnet med MISKAM som funktion af vindretning. Der er antaget en gennemsnitlig emission og en konstant vindretning, og der er ikke foretaget en vægtning af vindretningerne. Der er kun taget hensyn til lokale kilder på forpladsen. Det betyder at bidrag fra andre kilder samt baggrundskoncentration ikke er regnet med.

Figur 6.4 viser modelresultater for hele 2010 for koncentrationerne af NO_x og PM_{2,5} ved Station B4 med både OML og MISKAM. MISKAM og OML viser god overensstemmelse for den samlede NO_x-koncentration, men begge giver koncentrationer, som ligger væsentligt over målingerne. En overestimering ses også for PM_{2,5}, selv om den er mindre tydelig pga. den relativt høje baggrundskoncentration. Mulige årsager til overestimering i forbindelse med modelberegningerne er følgende:

- Emissionsopgørelsen resulterer i for høje emissioner på lufthavnsområdet (for høje aktivitetsdata eller for høje emissionsfaktorer)
- I 2010 var der en længere periode uden anvendelse af B2 og B4 på grund af ombygninger. Dette har det indtil videre ikke været muligt at tage hensyn til i modelberegningerne.
- I modellerne er der gjort en række antagelser for at beskrive den initiale spredning af udledningerne. Det er muligt at disse antagelser fører til for lille initialfortynding af udledningerne fra flymotor og APU.

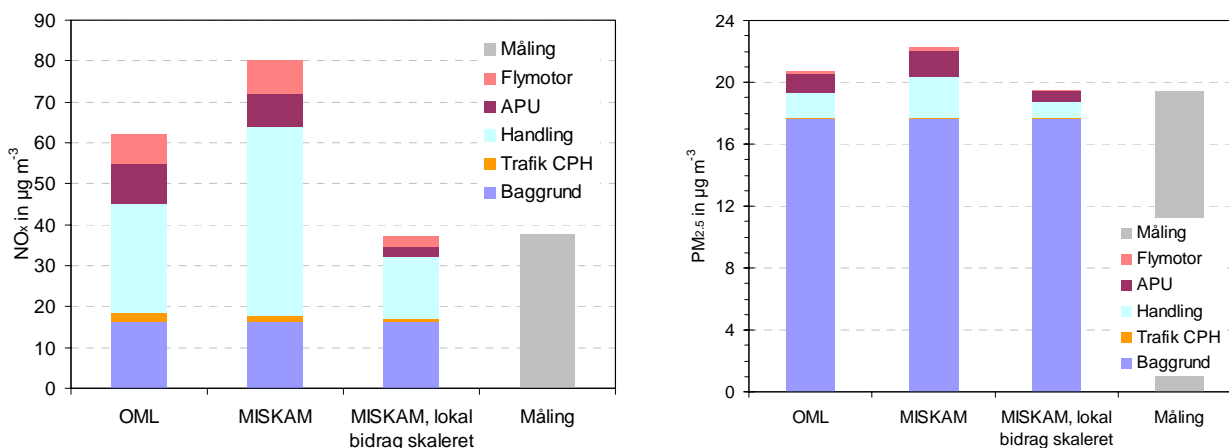
Den væsentligste årsag til at modellerne beregner for høje koncentrationer set i forhold til måleresultaterne er mest sandsynligt, at emissionsopgørelsen resulterer i for høje emissioner, men der er behov for yderligere arbejde for nærmere at belyse årsagen til overestimering i modelberegningerne.

Fordeling af koncentrationsbidrag fra de fire kildegrupper er lidt forskellig i de to sæt modelberegninger med især et højere bidrag fra handling i MISKAM i forhold til OML. Dette skyldes formodentligt den højere rumlige opløsning i MISKAM-modellen, hvor kilderne er placeret med 5 meters nøjagtighed, mens opløsningen i OML kun er på 50 meters nøjagtighed.

For at udnytte den samlede information fra modelberegninger og målinger bedst muligt er der foretaget et estimat, hvor resultaterne fra MISKAM for de lokale bidrag fra forpladsen er skaleret med en empirisk faktor. Baggrundskoncentrationerne er ikke skaleret, da der er relativt god overensstemmelse mellem måleresultater og modelberegninger. Denne metode giver det foreløbige bedste bud på kildebidragene til NO_x og PM_{2,5}. De relative kildebidrag på Station B4 er vist i Tabel 6.1.

Tabel 6.1. Kildebidrag (i %) til NO_x og PM_{2,5} ved Station B4 estimeret ud fra MISKAM med skalerede lokale bidrag.

Stof	Baggrund	Flymotorer	APU	Handling	Trafik ved lufthavn
NO _x	44	7	7	41	1
PM _{2,5}	91	0,4	3	6	0,1



Figur 6.4. Årsmiddelkoncentrationer i 2010 for NO_x og PM_{2,5} ved Station B4 beregnet med OML og MISKAM samt målt. Endvidere et estimat, hvor alle lokale bidrag (undtagen baggrund) er skaleret med en faktor på ca. 1/3 for at give overensstemmelse mellem målingerne og modelberegningerne.

For at illustrere den horisontale variation blev der beregnet koncentrationer og kildefordeling for i alt 17 punkter langs terminalbygningen (Figur 6.5 og 6.6). Tabel 6.2 viser gennemsnits NO_x-koncentration for de 17 punkter, det gennemsnitlige relative bidrag af de forskellige kilder og minimum/maksimum værdier for deres kildebidrag blandt alle punkter.

Tabel 6.2. Kildebidrag til NO_x for 17 punkter på forpladsen estimeret ud fra MISKAM med skalerede lokale bidrag.

NO _x	Baggrund	Flymotorer	APU	Handling	Trafik ved lufthavn
Gennemsnit (µg/m ³)	16	3	2	13	1
Andel (%)	46	8	6	37	3
Andel Min (%)	35	5	3	19	0,3
Andel Max (%)	59	15	11	54	17

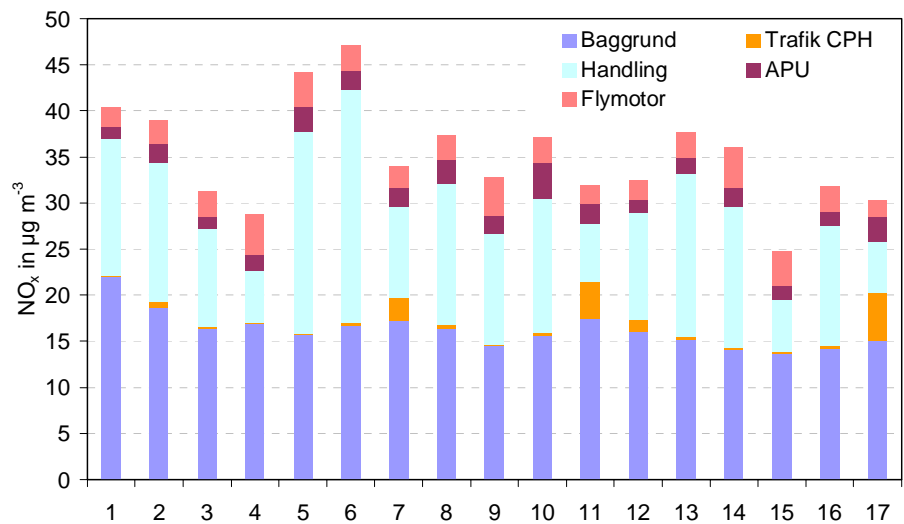
Modelberegningerne for de 17 punkter på forpladsen viser, at NO_x primært kommer fra baggrund (46%; min 35%- max 59%) og handling (37%; 19-54%) med mindre bidrag fra APU (6%; 3-11%), hovedmotorer (8%; 5-15%) og trafik på forpladsen (3%; 0.3-17%).

Trafikken på forpladsen bidrager kun ved beregningspunkterne tættest ved terminalbygningerne (punkterne 7, 11, 12 og 17). Størst bidrag fra flyenes hovedmotorer ses ved beregningspunkterne, som ligger længst ude mod flyenes køreveje (for eksempel beregningspunkt 4 og 5). Disse to beregningspunkter illustrerer endvidere den store indflydelse af afstand og retning til handlingsområderne. Ved beregningspunkt 4 er bidrag fra handling omkring en tredjedel af bidrag fra handling ved beregningspunkt 5. Årsagen til det relativt lavere bidrag fra handling ved beregningspunkt 4 er først og fremmest at beregningspunkt 4 ligger omkring 30 m væk fra handlingsområdet, mens beregningspunkt 5 ligger i selv handlingsområdet. Endvidere er beregningspunkt 4 placeret mere åbent i forhold til bygningerne end beregningspunkt 5, hvilket formentligt også er en del af forklaringen på det mindre bidrag fra handling ved beregningspunkt 4 set i forhold til beregningspunkt 5.

Bidrag fra APU afhænger ligeledes af afstanden til det område, hvor APU typisk anvendes i forbindelse med gatene. Beregningspunkt 1, 3, 12 og 16 ligger langt fra disse områder, og der ses et lille bidrag fra APU.



Figur 6.5. Beliggenhed af de 17 beregningspunkter på forpladsen. Punkt 8 svarer til position af Station B4. Kort viser byningerne, som de er repræsenteret i gittercellerne i MISKAM-modellen og farverne af bygningerne svarer til forskellige bygningshøjder. Figuren viser endvidere fordelingen af emissionerne fra handlingskøretøjerne. Mørkerød angiver højeste emissioner mens grøn angiver mindste emissioner.



Figur 6.6. Resultater for de 17 beregningspunkter i Figur 6.5. Årsmiddelkoncentrationer af NO_x fordelt på bidrag for de forskellige kildegrupper. Lokale bidrag fra forpladsen er skaleret ned med en empirisk faktor (reduceret med 1/3) for at opnå overensstemmelse mellem målte og modelberegnete koncentrationer på Station B4.

6.3 Delkonklusion

Der er udført modelberegninger af NO_x og PM_{2,5} for lufthavnen og selve forpladsen.

Når usikkerheden på aktivitetsdata, emissionsopgørelser og modelberegninger tages i betragtning, så er der generelt en rimelig overensstemmelse mellem modelberegninger og måleresultater.

Modelberegningerne viser, at NO_x på forpladsen ved Station B4 primært kommer fra baggrund (44%) og handling (41%) med mindre bidrag fra APU (7%) , hovedmotorer (7%) og trafik på forpladsen (1%).

Modelberegningerne viser, at PM_{2,5} på forpladsen primært kommer fra baggrund (91%) med mindre bidrag fra handling (5.5%), APU (3.4%), hovedmotorer (0,4%) og trafik på forpladsen (0,1%).

Modelberegningerne giver navnlig for høje koncentrationer for NO_x på forpladsen. Undersøgelser peger på, at det er de beregnede emissioner på forpladsen, som er for høje. Der er derfor behov for at genvurdere de aktivitetsdata, som emissionsopgørelsen er bygget på. Ovenstående vurdering af kilderne skal tages med forbehold for denne usikkerhed.

Yderligere detaljer om modelberegningerne kan findes i Bilag 4.

7 Konklusion

I det følgende opsummeres de væsentligste konklusioner på undersøgelsen.

NO₂, PM_{2,5}, benzen og geografisk fordeling

- NO₂, PM_{2,5} og benzen på forplads ved Station B4 ligger alle under grænseværdien for luftkvalitet.
- Den geografiske fordeling af NO₂, PM_{2,5} og benzen er relativt ens og afspejler aktivitet, bygningsforhold og meteorologi. De højeste koncentrationer ses på indre forplads med aftagende koncentrationer ud mod den ydre forplads og periferien af lufthavnen. Tilsvarende fordeling må forventes for partikelantal.
- Ved vagten ved Gate Øst måles relativ høj forurening, som følge af køretøjer.

Partikelantal

- Partikelantal (6-700 nm) på forpladsen ved Station B4 er omkring to til tre gange højere end på HCAB.
- 85 - 90 % af partiklerne er partikler med diameter på 6-40 nm.
- Ved Station Øst og Vest ses partikelantal der er 20-40 % lavere end ved HCAB. Sammenhængen mellem vindretning og partikelantal viser, at en stor andel af disse partikler stammer fra lufthavnen.
- Døgnvariationen svarer til variationen i den samlede aktivitet vurderet på basis af antal flyafgange.

Forsøg med ændret praksis omkring Station B4 og kildesporing

- Københavns Lufthavne A/S's forsøg med ændring af praksis for opstart og anvendelse af elgrej omkring Station B4 demonstrerede ikke tydelige ændringer i NO_x og partikelantal ved Station B4. Dette skyldes, at den naturlige variation i de meteorologiske forhold fra uge til uge gav anledning til stor variation i NO_x og partikelantal, hvilket gjorde det umuligt at vurdere effekten af ændring i praksis.
- Forsøg med kildesporing viste tydeligt, at køretøjer (handling, sne-rydning m.m), hovedmotorer og APU er kilder til det høje partikelantal på forpladsen.
- Forsøg med kildesporing illustrerede desuden, at anvendelse af elgrej fører til lavt partikelantal i en handlingssituation.

Betydning af svovl

- Kampagnen med måling af SO₂ viser, at koncentrationen af SO₂ ligger langt under grænseværdierne.
- Der er et vist tidsligt sammenfald mellem høje koncentrationer af SO₂ og stort partikelantal.

- Svovlindhold i flybrændstof er på 940 ppm, mens det i køretøjer er på 10 ppm.
- Måleresultaterne, det høje svovlindhold i flybrændstof og viden fra litteraturen indikerer tilsammen, at en del af partiklerne kan være sulfatpartikler dannet ved forbrænding af svovl i flybrændstof.

Organiske forbindelser

- Målinger af VOC viste resultater på niveau med bybaggrund i København, dog ses lettere forhøjede koncentrationer af udvalgte repræsentative VOC'er for jetfuel, f.eks. n-octan samt o-, m- og p-xylen.
- Middelkoncentrationerne af aldehyder ligger generelt betragteligt under effektniveauerne for irritation. Det kan dog ikke udelukkes at højere koncentrationer kan forekomme i kortere tidsrum end de 8-timers middelværdier, som er anvendt ved prøveopsamlingen i denne undersøgelse.
- Niveauet af organisk kulstof (OC) er sammenligneligt med trafikerede gader i København, mens "sod" (EC) og sodandelen af total partikulært kulstof ligger på et niveau mellem landlig baggrundsluft og trafikerede gader.
- PAH på forpladsen udgør ca. en tredjedel af koncentrationen på trafikerede gader i København, og typisk fra 6-31% af koncentrationerne målt på Leonardo Da Vinci lufthavnen i Rom (Cavallo et al., 2006).
- Benz(a)pyren ligger med stor sandsynlighed under luftkvalitetsmålværdien på 1 ng/m³.

Emissionsopgørelse

- Der er udarbejdet en detaljeret emissionsopgørelse for hele lufthavnen inkluderende emissionerne fra handling, trafik på lufthavn, APU og hovedmotorer.
- Opgørelsen omfatter NO_x, PM_{2,5}, CO og kulbrinter.
- Emissionsopgørelsen viser, at handling og APU er de væsentligste kilder i forbindelse med luftforureningen på selve forpladsen. For PM_{2,5} kommer omkring 51%, 45% og 4% fra henholdsvis handling, APU og hovedmotorer. For NO_x stammer omkring 63%, 25% og 12% fra handling, APU og hovedmotorer. Emissionsopgørelsen peger på, at omtrent halvdelen af emissionen af partikelmasse fra hovedmotorer udgøres af sulfatpartikler, der stammer fra svovl i flybrændstof. Udledningerne fra APU vil også i et vist omfang skyldes svovl i flybrændstof, men andelen kan ikke umiddelbart kvantificeres.

Modelberegninger og kilderne

- Der er udført modelberegninger for lufthavnen og selve forpladsen.
- Når usikkerheden på aktivitetsdata, emissionsopgørelser og modelberegninger tages med i betragtning, så er der generelt en rimelig overensstemmelse mellem modelberegninger og måleresultater.
- Modelberegningerne viser, at NO_x på forpladsen primært kommer fra baggrund (44%), handling (41%), APU (7%) , hovedmotorer (7%) og trafik på forpladsen (1%).

- Modelberegningerne viser at $PM_{2,5}$ på forpladsen primært kommer fra baggrund (91%), handling (5%), APU (4%), hovedmotorer (0,3%) og trafik på forpladsen (0,5%).
- Modelberegningerne omfatter ikke partikelantal. Det skønnes, at de væsentligste kilder til det høje antal partikler er handling, flymotorer og APU. Det har ikke været muligt at foretage en egentlig kvantificering af bidragene fra disse tre kilder til partikelantallet.
- Modelresultaterne viser for høje beregnede koncentrationer for NO_x på forpladsen. Undersøgelser peger på, at det er emissionerne på forpladsen, som er vurderet for højt. Der er derfor behov for at genvurdere de aktivitetsdata, som emissionsopgørelsen er bygget op på. Ovenstående vurdering af kilderne skal tages med forbehold for denne usikkerhed.

Den kemiske sammensætning

- Det har ikke været muligt inden for nærværende undersøgelse at lave en direkte analyse af den kemiske sammensætning af de små partikler med diameter fra 6-40 nm.
- Målingerne af SO_2 , emissionsopgørelsen og litteraturundersøgelse peger på, at en relativt stor andel af partikelantallet kan bestå af sulfatpartikler fra forbrænding af svovl i brændstof.
- Målingerne af partikulært elementært kulstof (sod) viser, at en del af partikelantallet udgøres af elementært kulstof.
- Derudover forventes delvist forbrændt brændstof (fly eller handlingskøretøjer) at være årsag til væsentlig del af de resterende små partikler med diameter fra 6-40 nm.

8 Referencer

Aviation fuel Technical review, 2006. Chevron Corporation.

Brasseur, G.P., Cox, R.A., Hauglustaine, D., Isaksen, I., Lelieveld, J., Lister, D.H., Sausen, R., Schumann, U., Wahner, A., Wiesen, P., 1998: European scientific assessment of the atmospheric effects of aircraft emissions. *Atmospheric Environment* 32, 2329-2418.

Cavallo, D., Cinzia, L. U., Carelli, G., Iavicoli, I., Ciervo, A., Perniconi, B., Rondinone, B., Gismondi, M. & Iavicoli, S., 2006: Occupational exposure in airport personnel: Characterization and evaluation of genotoxic and oxidative effects. *Toxicology* 223, pp. 26-35.

Darley, E., Middleton, J., Garber, M., 1960: Plant damage and eye irritation from ozone-hydrocarbon reactions. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 8(6), 483-484.

Eichhorn, 1996: Validation of a microscale pollution dispersal model. in: *Air Pollution Modeling and its Application IX*. New York, London, Plenum Press. pp. 539-548.

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketznel, M. & Jensen, S.S., 2011: The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2010. National Environmental Research Institute, Aarhus University. 55 pp. -NERI Technical Report No. 836.

EU, 2005: Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air. *Official Journal of the European Union* L23/3.

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

ICAO, 2007: Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889), preliminary edition 2007, International Civil Aviation Organization.

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

Kuykendall, J.R., Shaw, S.L., Paustenbach, D., Fehling, K., Kacew, S., Kabay, V., 2009: Chemicals present in automobile traffic tunnels and the possible community health hazards: A review of the literature. *Inhalation Toxicology* 21(9): 747-792.

Lohmeyer, 2011: <http://www.lohmeyer.de/eng/Software/default.htm>

Massling, A., Nøjgaard, J.K., Ellermann, T., Ketzel, M., Nordstrøm, C., 2011: Particle project 2008 – 2010. Particulate contribution from traffic in Copenhagen. National Environmental Research Institute, Aarhus University. 62 pp.- NERI Technical report No. 837. <http://www2.dmu.dk/Pub/FR837.pdf>

Olesen, H. R., Berkowicz, R., Ketzel, M. and Løfstrøm, P., 2009: Validation of OML, Aermod/Prime and Miskam Using the Thompson Wind-Tunnel Dataset for Simple Stack-Building Configurations. *Boundary-Layer Meteorology* 131, 73-83.

Sorokin, A, Arnold, F., 2006: Organic positive ions in aircraft gas-turbine engine exhaust, *Atmospheric Environment* 40, 6077-6087.

Weber-Tschopp, A., Fischer, T., Gierer, R., Grandjean, E., 1977. Experimentelle reizwirkungen von akrolein auf den menschen. *International Archives of Occupational Environmental Health* 40(2), 117- 30.

Woodruff, T.J., Wells, E.M., Holt, E.W., Burgin, D.E., Axelrad, D.A., 2007: Estimating Risk from Ambient Concentrations of Acrolein across the United States. *Environ Health Perspectives* 115(3), 410–415.

Bilag 1: Målinger

Målemetoder (NO, NO₂, SO₂, PM_{2,5})

Måling af gasser (NO, NO₂ og SO₂)

Københavns Lufthavne A/S indkøbte i 2008 i alt tre NO_x-monitører af typen API M200E, som er blevet anvendt til målingerne på de tre målestationer (Station B4, Øst og Vest). Monitorerne måler kontinuerligt koncentrationen af kvælstofoxid (NO) og kvælstofoxider (NO_x = NO + NO₂), og ved subtraktion af NO fra NO_x bestemmes koncentrationen af NO₂.

I ferbruar-marts 2011 blev der endvidere målt SO₂ med monitor af typen API 100A.

Monitorerne kan måle koncentrationerne med midlingstid ned til et minut, men i forbindelse med overvågningen på Københavns Lufthavn Kastrup anvendes halvtimes-middelværdier.

Nøjagtigheden af målingerne sikres ved ugentligt, at teste monitorerne overfor certificeret referencegas (500 ppm NO eller 200 ppm SO₂). Dette kaldes spangascheck. For at kunne gennemføre dette automatisk er monitorerne tilkoblet et såkaldt spangasskab, som sikrer, at der en gang ugentligt i 15-20 minutter tilføres referencegas til monitorerne. Endvidere udføres der kontrol med monitorernes nulpunkt ved dagligt i 15-20 minutter at tilføre såkaldt nulluft til monitorerne. Nulluft består af udeluft rensat for de målte gasser ved hjælp af en rensepatron bestående af kaliumpermanganat og aktivt kul. På basis af nulpunkts- og spangasmålingerne foretages en løbende kalibrering af monitorerne.

Den rutinemæssige drift af monitorerne følger procedurer fastlagt i forbindelse med DCE's akkreditering og følger de standarder, som anvendes i forbindelse med den af DCE udførte nationale overvågning af luftkvalitet i Danmark.

Måling af PM_{2,5}

Københavns Lufthavne A/S indkøbte i 2008 i alt tre måleinstrumenter til måling af PM_{2,5} af typen TEOM serie 1400a PM_{2,5} monitor monteret med serie 8500 FDMS kit. Instrumenterne er forsynet med et PM₁₀-indtagshoved og en PM_{2,5}-cyklon, som sikrer, at det er partikler med aerodynamisk diameter mindre end 2,5 µm, som opsamles i instrumentet. Måling af partikelmassen sker i TEOM-delen (Tapered Oscillating Microbalance), hvor partiklerne bliver opvarmet til 30 °C. Der sker en vis fordampning af partikelmassen, men via FDMS-delen korrigeres for dette tab af partikler. Målingerne med TEOM-FDMS giver derfor resultater, som er sammenlignelige med DCE's målinger af PM_{2,5} i den nationale overvågning af luftkvalitet, hvor der anvendes de såkaldte SM200-monitører. Målingerne af PM_{2,5} med TEOM-FDMS fortages som time-middelværdier, hvilket er den primære fordel ved disse instrumenter.

SM200-monitorerne giver kun døgnmiddelværdier. Drift og vedligeholdelse af TEOM-FDMS er fastlagt i DCE's procedurer herfor. Disse følger anbefalingerne fra fabrikanten.

Partikelantal

Målingerne af antal og størrelsesfordeling af ultrafine partikler foretages med DCE's Differential Mobility Particle Sizer (DMPS), som dækker partikelstørrelser fra 6-700 nm (mobilitets diameter), hvoraf det kun er partiklerne under 100 nm, som betegnes ultrafine. Målingerne foretages i scan af 2 minutters varighed, som aggregeres til ½-timesmiddelværdier. Indtaget til DMPS er placeret i ca. 2,5 m højde. Målingerne på lufthavnen er magen til de målinger, som foretages i forbindelse med den nationale overvågning af luftkvalitet under NOVANA (Ellermann et al., 2011)..

Simple metoder til bestemmelse af NO₂, benzen og PM_{2,5}

I forbindelse med feltkampagnen til bestemmelse af den horisontale variation af luftkvaliteten på forpladsen blev der i en fem ugers målekampagne målt NO₂, benzen og PM_{2,5} med simple og relativt billige metoder. Dette gjorde det muligt at gennemføre målingerne på 15 målesteder.

Opsamling af benzen og andre flygtige aromatiske forbindelser blev foretaget med passiv opsamling på Radiellorør til benzen (Skov et al., 2001a og referencer heri). For at sikre en god reproducerbarhed på prøveopsamlingen blev der opsamlet parallelt på to Radiellorør per lokalitet per opsamlingsperiode. Der blev anvendt opsamlingsperiode på en uge.

Opsamling af NO₂ blev foretaget med passiv opsamling på Radiellorør til NO₂ (Sigma Aldrich, 2011). For at sikre en god reproducerbarhed på prøveopsamlingen blev der opsamlet parallelt på tre Radiellorør per lokalitet per opsamlingsperiode. Der blev anvendt opsamlingsperiode på en uge.

De i alt fem Radiellorør blev typisk opsat i elmastene på forpladsen i omkring 1,5 til 2 m højde (Figur B1.1). De seks Radiellorør var monteret med skruebeslag inde under den omvendte spand (Figur B1.1, indsatte billede). Den omvendte spand sikrede, at rørene var beskyttet mod regn og kraftig vind samtidig med, at rørene var frit eksponeret for den omgivende luft.

Efter endt opsamling blev Radiellorørene indsamlet og analyseret, således af luftkoncentrationer af henholdsvis benzen og NO₂ kunne bestemmes.



Figur B1.1. Det simple udstyr til opsætning af Radiellorørene til opsamling af benzen og NO₂. Rørene er placeret nedenunder den hvide spand. Det lille indsatte billede viser, hvordan de seks Radiellorør er monteret i spanden.

Målingerne af PM_{2,5} blev foretaget med simpelt udstyr (Figur B1.2), hvor en lille pumpe suger fire liter luft per min igennem et partikelfilter (GA055.037 Glasfiberfiltre GA-55 37 mm, Frisenette) med konstant hastighed. Flowhastigheden kontrolleredes med datalogger. Efter en uges opsamling skiftes filteret. Den opsamlede partikelmasse bestemmes ved vejning af filtret før og efter opsamling. Vejningen foretages efter to døgn's konditionering af filtrene i vejerum med 50% luftfugtighed og 20°C. Ved at dividere den opsamlede partikelmasse med luftvolumen bestemmes PM_{2,5}. En PM_{2,5}-cyklon (Figur B1.2, indsatte billede) sørger for, at det kun er partikler med diameter under 2,5 µm, som opsamles på filteret.



Figur B1.2. Den simple opsamler til bestemmelse af $PM_{2.5}$. Det indsatte billede viser luftindtaget (det vandrette klare plasticrør), cyklonen (metaldelen) og partikelfilterholderen (plasticholderen med nummeret). Under brugen er cyklon og partikelfilterholderen beskyttet af plastickepper (til højre på det store billede). Pumpen er placeret inde i den grå kasse. Under opsamlingen blev flowhastighed kontrolleret med datalogger, som ligeledes sidder inde i kassen. Opsamleren var forsynet med netspænding.

Partikelantal

Tabel B1.1 angiver det gennemsnitlige antal partikler målt i perioden august-december 2010 på forpladsen (Station B4) og ved overvågningsstationen (Station Øst) samt ved gadestationen på HCAB, bybaggrundsstation på H.C. Ørsteds Institut (HCØ), og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby, Roskilde. De tre sidste stationer er medtaget som sammenligningsgrundlag. Der ses stor forskel mellem målestationerne, næsten en faktor 9 mellem højeste (B4) og laveste værdi (Lille Valby). Det fremgår tydeligt, at der var betydeligt (faktor 3,2) højere antal partikler ved Station B4 end ved Station Øst. Station B4 lå på ca. det dobbelte antal af partikler målt ved HCAB, mens Station Øst lå omtrent 40% under HCAB. HCAB regnes for en af de mest forurenede gadestrækninger i København. Stationer HCØ og Lille Valby lå meget lavere end de tre øvrige stationer.

Tabel B1.1. Gennemsnitligt antal partikler målt ved Station B4, Station Øst, HCAB, HCØ og Risø i perioden fra august – december 2010.

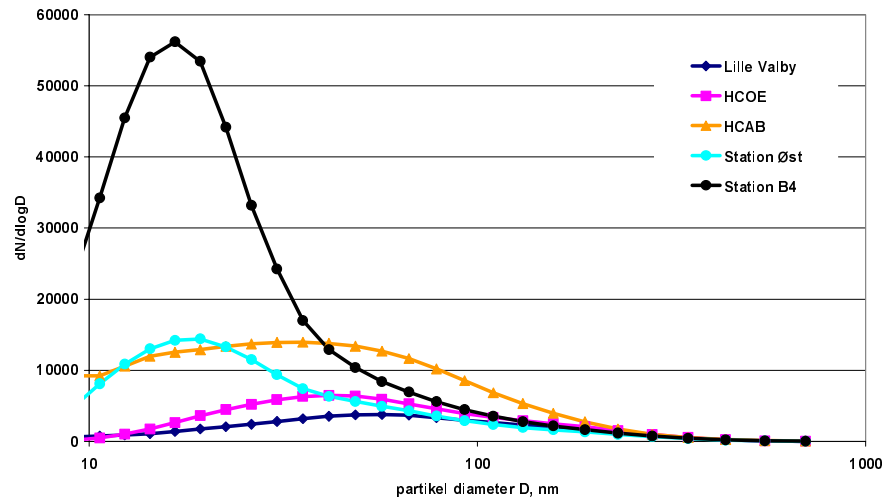
Station	Gennemsnitligt antal partikler partikler/cm ³
Station B4	31900
Station Øst	10000
HCAB	16100
HCØ	5500
Risø	3700

Figur B1.3 viser den gennemsnitlige partikelstørrelsesfordeling, som det er praksis at præsentere resultaterne i forbindelse med videnskabelige publikationer inden for dette fagfelt. Partikeldiameteren er angivet på logaritmisk skala. For at få et retvisende indtryk af partikelstørrelsesfordelingen angives y-aksen i enheden $dN/d(\log D)$, hvor N er antal partikler og D er diameter. "d" angiver, at der er tale om afledede værdier. Således svarer den totale partikelkoncentration til arealet under kurven.

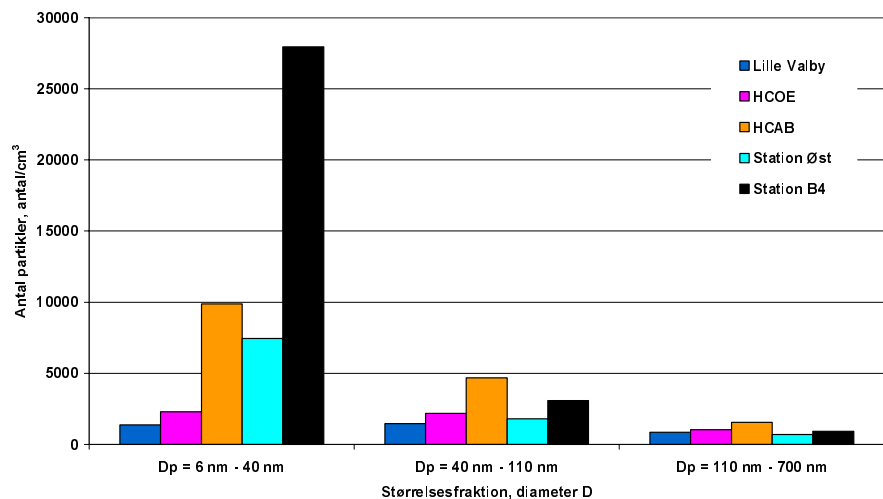
Figur B1.4 viser en simplere version af partikelstørrelsesfordelingen, hvor partiklerne er opdelt i tre størrelsesfraktioner:

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

Af Figur B1.3 og B1.4 ses det tydeligt, at det store antal partikler ved Station B4 skyldes et højt antal af de mindste partikler fra 6-40 nm. Station B4 lå endvidere betydeligt højere end de øvrige stationer. Således lå Station B4 3,7, 2,8, 12 og 20 gange højere end henholdsvis Station Øst, HCAB, HCØ og Lille Valby. Årsag til det meget høje antal for den mindste størrelsesfraktion ved Station B4 er formentligt hovedsageligt direkte udledninger fra jetmotorer (se afsnit om litteraturundersøgelser). Station Øst er også påvirket af disse udledninger enten via transport med vinden fra forpladsen eller som følge af udledningerne fra lettende eller landende fly.



Figur B1.3. Gennemsnitlig partikelstørrelsesfordelingen målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB, bybaggrundsstationen HCØ (HCOE) og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby / Risø, Roskilde. Målingerne er foretaget fra august 2010 til december 2010.



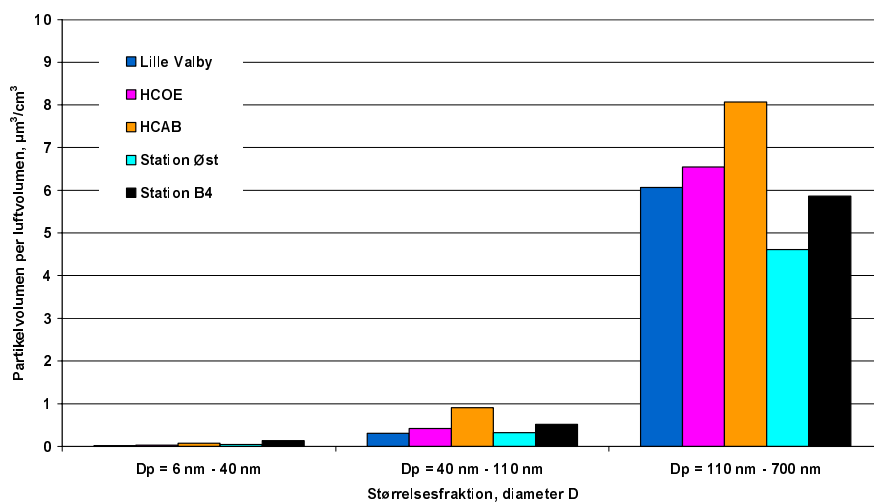
Figur B1.4. Gennemsnitligt partikelantal fordelt på tre størrelsesfraktioner målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB, bybaggrundsstationen HCØ (HCOE) og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby / Risø, Roskilde. Målingerne er foretaget fra august 2010 til december 2010.

For den mellemste størrelsesfraktion (40-110 nm) ses, at forskellen mellem Station B4, Station Øst, HCAB, HCØ og Lille Valby var meget mindre. For disse fire stationer lå partikelantal højest på HCAB, næsthøjest Station B4 med ca. 30 % mindre koncentration og efterfølgende Station Øst, HCØ og Lille Valby som lå henholdsvis 54 % 62 % og 69 % under HCAB.

For den største størrelsesfraktion (110-700 nm) er forholdene mellem stationerne sammenlignelig med det der observeredes for den mellemste størrelsesfraktion. Niveaulet lå højest på HCAB, mens koncentrationer for

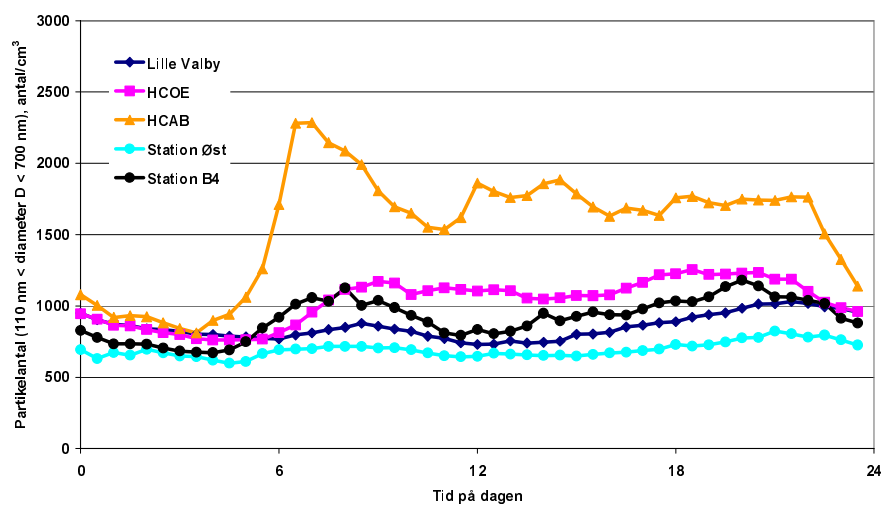
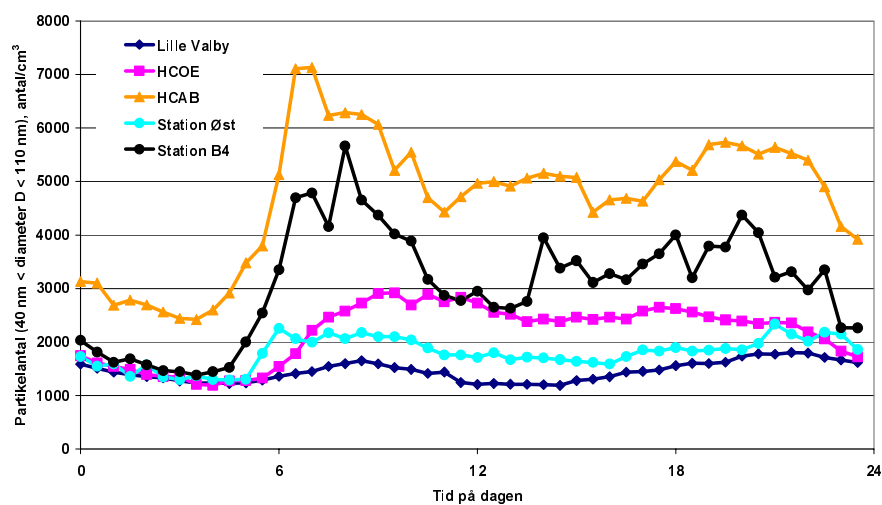
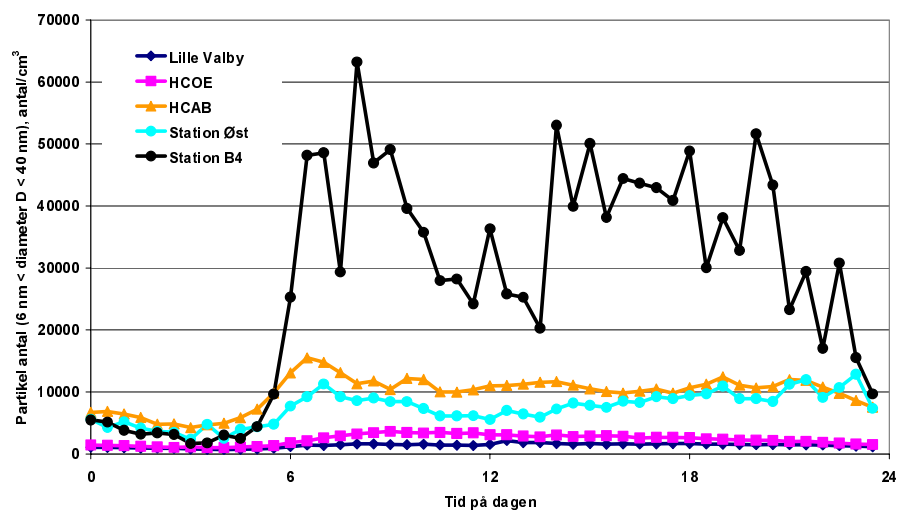
HCØ, Station B4, Lille Valby og Station Øst er henholdsvis 34 %, 41 %, 45 % og 55 % lavere end for HCAB. Årsagen til dette er, at en stor del af partiklerne i denne størrelsesfraktion er langtransporterede, og disse har derfor en jævn geografisk fordeling. Det lidt højere niveau på HCAB skyldes formodentlig emissioner fra vejtrafikken.

I Figur B1.5 vises tilsvarende tal, som i Figur B1.4, men i stedet for partikelantal vises partikelvolumen. Ved at gange med partikeldensitet (omkring 1-1,5 g/cm³) kan volumen omregnes til partikelmasse. Partikelvolumen var størst for den store fraktion fra 110 – 700 nm. Det største volumen blev målt ved HCAB, mens HCØ, Lille Valby og Station B4 lå omkring 20 % til 30 % lavere. Station Øst lå ca. 45 % lavere end HCAB. Forskellene mellem stationerne i partikelvolumen er her meget mindre end for partikelantal. Årsagen til dette er, at en stor del af partiklerne i den største størrelsesfraktion (som dominerer partikelvolumen) er langtransporterede, og disse har derfor en jævn geografisk fordeling. Samme tendens observeres også for PM_{2,5}.



Figur B1.5. Gennemsnitligt partikelvolumen koncentration fordelt på tre størrelsesfraktioner målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB, bybaggrundsstationen HCØ (HCOE) og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby / Risø, Roskilde. Målingerne er foretaget fra august 2010 til december 2010.

Døgnvariation i partikelantallet (Figur B1.6) er relevant i forbindelse med vurdering af kilderne til partiklerne og i forhold til personalets eksponering for partiklerne. Da den gennemsnitlige døgnvariation kun er baseret på målinger fra fem måneder er der en vis "støj" på døgnvariationen, som følge af de naturlige variationer i de meteorologiske forhold.



Figur B1.6 Gennemsnitlig døgnvariation for partikelantal koncentration fordelt på tre partikelstørrelser målt ved Station B4, Station Øst, gadestationen HCAB, bybaggrundsstationen HCØ (HCOE) og den regionale baggrundsstation ved Lille Valby / Risø, Roskilde. Målingerne er foretaget fra august 2010 til december 2010. Bemærk forskel i y-aksen for de tre figurer.

Ved Station B4 lå koncentration af partikelantal i den mindste partikel-fraktion (6-40 nm, øverste graf i Figur B1.6) i dagtimerne i området fra 20.000 til 60.000 partikler/cm³, hvilket var betydeligt højere end for HCAB, hvor niveauet i dagtimerne lå på 10.000 til 15.000 partikler/cm³. Station Øst (6.000 – 11.000 partikler/cm³) lå lidt under niveauet for HCAB, mens HCØ og Lille Valby lå lavest med under 5.000 partikler/cm³.

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

For den mellemste størrelsesfraktion (40 – 110 nm, midterste graf i Figur B1.6) svarede døgnvariation ved Station B4 ligeledes i store træk til den forventede døgnvariation i antallet af flyoperationer. Døgnvariationen ved Station B4 mindede også meget om døgnvariationen på HCAB, hvor der dog ikke var et markant fald omkring middagstid som for Station B4.

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

Litteraturundersøgelser

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

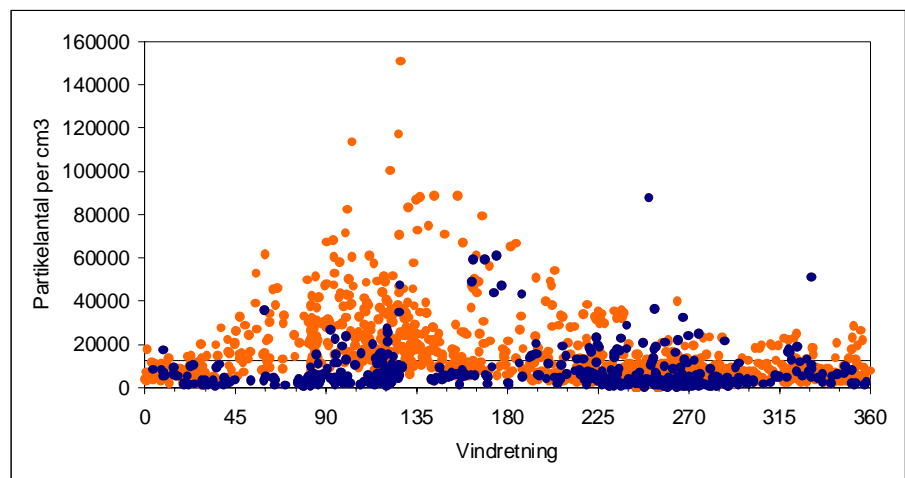
- Flyjetmotorer udleder et stort antal partikler. Herndon et al., (2005) og Mazaheri et al. (2009) målte emissionsindeks for antal partikler (EI_n) på 3-50 x 10¹⁵ partikler per kg brændstof.
- EI_n afhænger af motortype og af belastning af motor. EI_n er højest i forbindelse med tomgang (Herndon et al., 2005; Herndon et al., 2008; Mazaheri et al., 2009).
- Udledningerne er domineret af meget små partikler med diameter fra 10-40 nm (Mazaheri et al., 2008; Kinsey et al., 2010; Rogers et al., 2005).
- I røgfanen 80 m bag ved fly, der var i normal brug under taxi, blev der målt partikelantal (angivet i dN/d(logD)) på omkring 1

$\times 10^6$ partikler/cm³ for partikler med diameter på omkring 20 nm (Mazahari et al., 2009). (Denne måde at angive partikelantal på svarer til Figur B1.3, hvor det ses, at der for partikler med diameter på 20 nm målt et antal på 70.000 partikler/cm³ som ½-timesmiddelværdi).

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

Vindretningsafhængighed af partikelantal ved Station Vest

For at vurdere om de ultrafine partikler ved Station Vest stammer fra udledningerne på lufthavnen, er der blevet lavet en undersøgelse af partikelantallets variation med vindretningen. Af Figur B1.7 fremgår det, at der måles et større antal ultrafine partikler ved Station Vest i forbindelse med vindretninger fra omkring 40° til 250° end fra de øvrige vindretninger. Endvidere ses et tydeligt maksimum i antallet af ultrafine partikler i forbindelse med vindretninger fra omkring 75° til 135°. Af Figur B1.8 ses at vindretninger fra 40° til 250° dækker hele lufthavnsområdet inklusiv startbanerne, og at vindretninger fra 75° til 135° dækker store dele af forpladsen og den centrale del af området med rulleveje og startbaner. Dette viser, at årsagen til det høje antal af ultrafine partikler ved Station Vest skyldes udledningerne fra lufthavnen.



Figur B1.7. Partikelantal målt ved Station Vest, som funktion af vindretning. Orange angiver målinger om dagen og blå angiver målinger om natten. Den sorte vandrette streg angiver middeltal for alle vindretninger.



Figur B1.8. Kort med angivelse af kompasretninger. Station Vest er placeret midt i det hvide kryds. Kort: Google Earth.

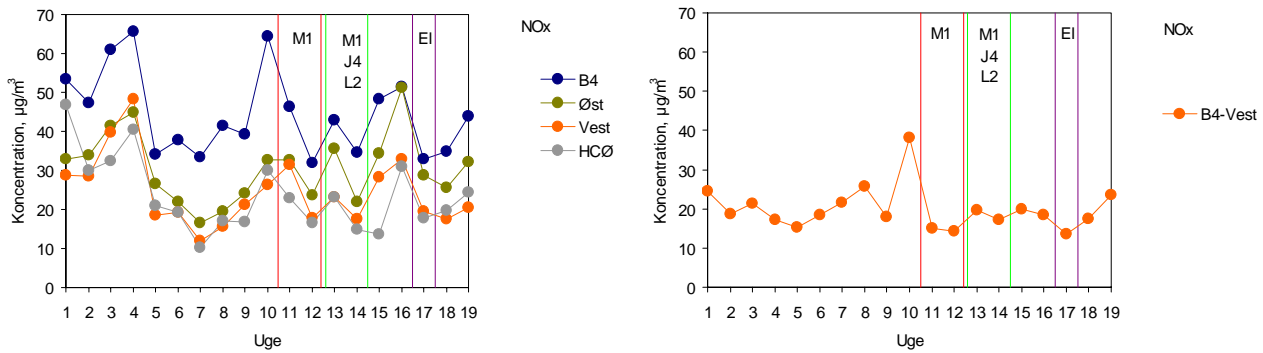
Vurdering af ændret praksis omkring Station B4

Fra uge 11 til 17 i 2011 gennemførte Københavns Lufthavne A/S en række test for at vurdere om ændring i praksis på forpladsen fører til reduceret luftforurening. Følgende test blev udført:

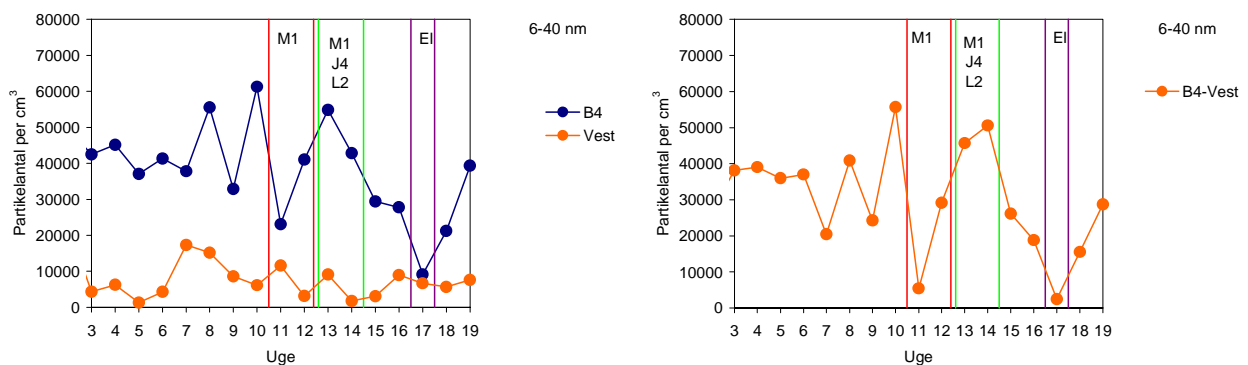
4. Uge 11-12: Opstartsposition M1 anvendes ikke
5. Uge 13-14: Opstartspositionerne M1, J4 og L2 anvendes ikke
6. Uge 17: Normal opstart, men kun anvendelse af elgrej til handling ved B4.

Figur B1.9 viser ugemiddelværdier fra kl. 7:00 til 20:00 for uge 3-19, 2011 for NO_x ved Station B4, dels hvor der ikke er korrigeret for variationerne i baggrunden, og dels hvor der er korrigeret for baggrunden (korrektionen består i at trække Station Vest fra Station B4). Figur B1.10 viser tilsvarende resultater for antallet af partikler med diameter fra 6-40 nm ved Station B4. De store variationer mellem ugerne skyldes primært variationer i de meteorologiske forhold (navnlig vindretning).

Ændringerne i praksis på lufthavnen giver relativt små ændringer i forhold til de samlede udledninger på forpladsen. Det vurderes derfor, at det ikke har været muligt at detektere ændringerne i praksis på lufthavnen som følge af de store variationer i meteorologien fra uge til uge. Denne vurdering er blandt andet baseret på, at Test 2 ligger højere end Test 1.



Figur B1.9. Ugemiddelværdier fra kl. 7:00 til 20:00 for NO_x (NO+NO₂) ved Station B4 samt en række andre målestationer til sammenligning. Venstre figur viser de direkte måleresultater, mens højre figur viser resultaterne efter korrektion for baggrunds-niveauerne. Korrektionen foretages ved at trække koncentrationerne ved Station vest fra Station B4. De lodrette linjer angiver de tre test perioder. M1 og M1, J4, L2 angiver perioderne hvor de nævnte opstartspositioner ikke anvendes. EI viser perioden, hvor handling ved B4 udelukkende foretages med elgrej.



Figur B1.10. Ugemiddelværdier fra kl. 7:00 til 20:00 for antal partikler med diameter fra 6 – 40 nm ved Station B4 og Station Vest. Venstre figur viser de direkte måleresultater, mens højre figur viser resultaterne efter korrektion for baggrunds-niveauerne. Korrektionen foretages ved at trække koncentrationerne ved Station vest fra Station B4. De lodrette linjer angiver de tre test perioder. M1 og M1, J4, L2 angiver perioderne hvor de nævnte opstartspositioner ikke anvendes. EI viser perioden, hvor handling ved B4 udelukkende foretages med elgrej.

Indflydelse af svovl

I dette afsnit gives en uddybende baggrundsinformation fra videnskabelige artikler om, hvordan svovlindholdet i flybrændstof påvirker dannelsen af partikler.

Kinsey et al. (2010) har målt emissionsindeks for partikelmasse (Elm; mg partikler per kg brændstof) som funktion af svovlindholdet i flybrændstof. Deres resultater viser, at emissionsindekset for partikelmasse stiger lineært med svovlindholdet i brændstoffet:

$$7\% \text{ rated thrust: Elm} = 0,043 \cdot S + 21$$

$$30\% \text{ rated thrust: Elm} = 0,044 \cdot S + 7,9$$

Elm ved 7% rated thrust er dobbelt så høj ved 900 ppm svovl, som ved 100 ppm svovl. Ved 30% rated thrust er Elm mindre, men til gengæld er forskellen mellem 900 ppm og 100 ppm næsten en factor 4.

Årsagen til den højere ikke svovlafhengige andel (21 versus 7,9) ved de to motorbelastninger er formentligt, at motorerne ved lavere belastning

har en ringere forbrænding. Derved kan udledningerne af ikke sulfatholdige partikler være højere ved lav belastning sammenlignet med højere belastning. Andre studier finder imidlertid, at EIm fra motoren er stigende ved stigende motorbelastning (stigende fra idle, taxi til take off; Mazaheri et al., 2009) i modsætning til studiet af Kinsey et al., (2010), hvor ligningerne ovenfor viser, at EIm er størst ved 7% rated thrust.

Kinsey et al. (2010) har også undersøgt emissionsindeks for partikelantal (EIn; antal partikler per kg brændstof), som ligeledes stiger med øget svovlindhold i brændsel, men her er stigningen eksponentiel. (der vises desværre ingen data for dette).

Kinsey et al. (2010) tilskriver stigningen i partikeludledningen en øget dannelse af sulfatpartikler ud fra svovlindholdet i brændslen. Først dannes svovlsyre (H_2SO_4), som enten danner nanopartikler direkte eller kondenserer direkte på eksisterende aerosoler.

Agrawal et al. (2008) har målt emissionsindekset for dannelse af partikulært sulfat (EIs; g S per kg brændstof) for en række forskellige motortyper ved fire forskellige "modes" for belastning af motoren. Emissionen stiger med belastningen af motorerne. For mode 1 (4-7 % belastning) er EIs på mellem 0,0003-0,002 g/kg brændstof afhængig af motortype. For den mest forurenende motor (type CFM56-7B22) udgjorde sulfatemissionen i et af forsøgene omkring 20% af den samlede emission af partikelmasse, mens det for et andet eksemplar af motoren, så helt anderledes ud. Der er tydeligvis forskel mellem motortyper og tilsyneladende også indenfor den samme type. Svovlindholdet i brændstof udgjorde 300 ppm.

Schröder et al. (1998) angiver, at 2.5 % af svovlindholdet i flybrændstof omdannes til sulfatpartikler ved et højt svovlindhold på 3000 ppm. For lavt indhold af svovl (20 ppm) vurderer de, at omdannelsesprocenten er højere. Schröder et al. har målt partikelantal i røgfanen efter cruisende fly i 9-10 km højde. De fandt, at der var et meget stort partikelantal, og at emissionsindeks for partikelantal var næsten 10 gange højere ved 3000 ppm S sammenlignet med 20 ppm. Endvidere så de, at partikelantallet voksede med en faktor 10 i løbet af de første 10 sekunders levetid af røgfanen. Denne vækst i partikelantal skyldes dannelse af nye sulfatholdige partikler, som følge af "nucleation".

Luftforureningen med organiske komponenter

I perioden 20.10.2010 – 17.11.2010 blev der gennemført en målekampagne i Københavns lufthavn ved gate B4, hvor $PM_{2,5}$ partikelfractionen blev opsamlet på kvartsfiltre og flygtige organiske stoffer (VOC), herunder aldehyder, blev opsamlet på adsorbenter (Tabel B1.2)

Prøveopsamling og analyse af VOC

Kampagnen er rettet mod VOC med 3-9 kulstofatomer, der blev opsamlet på Carbopack X, men omfatter eks. også n-hexadecan med 16 kulstofatomer, der er repræsentativ for jetfuel. Ethylen og til dels propen, der også emitteres fra flymotorer er ikke omfattet af kampagnen. Carbonylforbindelser, dvs. aldehyder og ketonstoffer, nedbrydes under opsam-

lingen på carbopack X og er i stedet opsamlet på 2,4-dinitrophenylhydrazin-coatede silicakolonner (DNPH) og derivatiseres til stabile hydrazoner. Analyse og opsamling af VOC afhænger bl.a. af stoffernes polaritet og reaktivitet.

VOC med karakter af hydrocarboner, eks. aromatiske forbindelser som benzen og n-octan, blev opsamlet over 24 timer med et flow på 10 ml/min. Adsorbenttrørene blev efterfølgende analyseret med termisk desorption – gas kromatografi - massespektrometri (TD-GC-MS). VOC blev kvantificeret overfor gasformige standarder med 2-fluorotoluen som intern standard, fratrukket blindprøve. Udover de VOC, der rutinemæssigt analyseres i det landsdækkende måleprogram for luftkvalitet (NOVANA LMP) i Danmark, blev der identificeret yderligere VOC på lufthavnen, som er beregnet ud fra en estimeret responsfaktor baseret på lignende standarder.

Aldehyderne blev opsamlet på DNPH coatede adsorbenter over 8 timer med et flow på 1,0 l/min. DNPH adsorbenterne blev efterfølgende ekstraheret med acetonitril og analyseret med High Performance – væske kromatografi med UV detektor (HPLC-UV/VIS). Aldehyderne blev kvantificeret overfor aldehydstandarder i acetonitril, fratrukket blindprøve.

Resultater fra måling af flygtige organiske stoffer (VOC)

VOC'er omfatter flygtige organiske stoffer fra naturlige kilder samt fra menneskeskabte kilder, eks. trafik og industri. For flere af VOC'erne er der både naturlige og menneskeskabte kilder. Benzen dannes eksempelvis under skovbrande, vulkaner og andre ufuldstændige forbrændingsreaktioner, hvoraf trafik, industri og opvarmning med fossile brændstoffer og biomasse er vigtige kilder.

I Delprogram for luft under NOVANA måles rutinemæssigt 16 VOC udover benzen på en bybaggrundsmålestation på H.C. Ørstedsinstituttet (HCØ) i København, idet de udgør en potentiel kilde til dannelse af ozon (O₃) i gadeniveau (Ellermann et al., 2011). Herudover er 7 VOC målt under den organiske målekampagne i lufthavnen, hvoraf ethylcyclohexan og n-hexan også er repræsentative for jetfuel (Aviation fuel technical review, 2006, Sorokin and Arnold, 2006). Aldehyder, eks. formaldehyd, dannes i mange typer atmosfærekemiske reaktioner ved oxidation af reaktive VOC i atmosfæren. Jetfuel indeholder dels flere reaktive VOC, der kan danne aldehyder, dels emitteres aldehyder direkte fra flymotorerne.

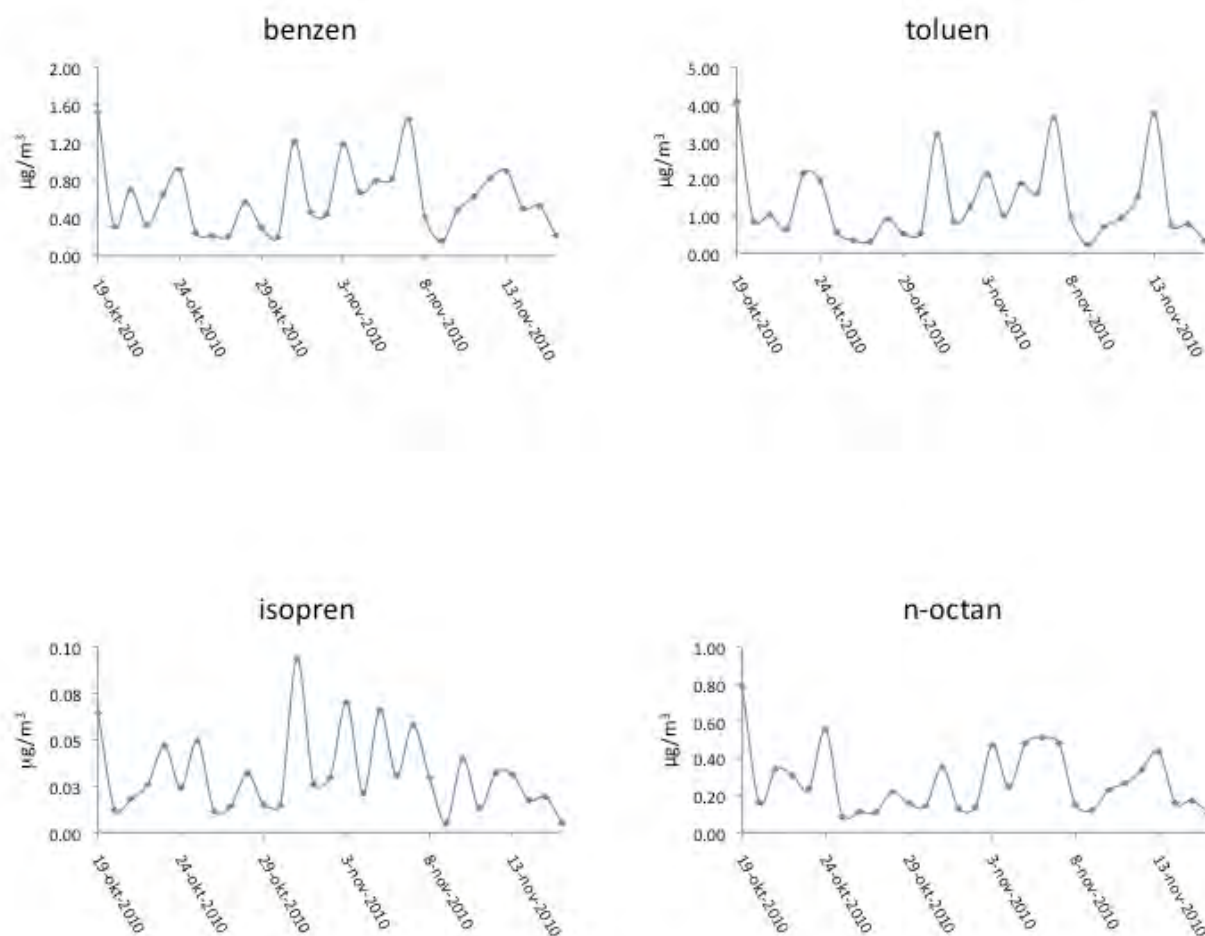
Tabel B1.2. Flygtige organiske stoffer (VOC) målt ved gate B4 sammenlignet med VOC målt i bybaggrund i København i samme måleperiode ($\mu\text{g}/\text{m}^3$). VOC angivet med fed skrift er målt i 50% højere koncentration eller mere ved gate B4 end i bybaggrund. VOC repræsentative for jettuel er angivet særskilt. Enkelte VOC (δ), der ikke måles rutinemæssigt i bybaggrund, er identificeret ved gate B4 og kvantificeret på baggrund af en estimeret responsfaktor.

	Københavns Lufthavn (B4)	Bybaggrund (HCØ)
VOC ($2,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)		
1-penten	0,05	0,04
n-pentan	0,39	0,51
trans-2-penten	0,02	0,04
2-methylpentan	0,27	0,33
n-hexan	0,21	0,20
n-heptan	0,19	0,25
2,2,2-trimethylpentan (isooctan)	0,05	0,08
1,3,5-trimethylbenzen	0,13	0,07
1,2,4-trimethylbenzen	0,59	0,26
1,2,3-trimethylbenzen	0,18	0,06
methylcyclohexan δ	0,25	
n-nonan δ	0,41	
n-tridecan δ	0,04	
n-tetradecan δ	0,08	
n-pentadecan δ	0,07	
VOC repræsentative for jettuel ($3,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Isopren	0,03	0,03
Benzen	0,57	0,71
Toluen	1,28	1,71
n-octan	0,23	0,04
Ethylbenzen	0,34	0,28
m,p-xylen	0,48	0,41
o-xylen	0,38	0,30
ethylcyclohexan δ	0,14	
n-hexadecan δ	0,04	
Aldehyder ($4,7 \mu\text{g}/\text{m}^3$)		
Formaldehyd	0,82	
Acetaldehyd	1,1	
acrolein	1,4	
Propanal	0,27	
Methacrolein	0,63	
Butanal	0,24	
Benzaldehyd	0,12	
Pentanal	0,07	
Hexanal	0,1	

Det ses i Tabel B1.2, at n-octan og de tre isomere af trimethylbenzen er målt i væsentligt højere koncentration ved gate B4 end i bybaggrund. Koncentrationerne af de enkelte stoffer er dog fortsat relativt lave (mindre end $0,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Flere af VOC, der er repræsentative for jettuel, findes i sammenlignelige eller højere koncentrationer i bybaggrund. Der er dog ikke tale om specifikke markører, og andre kilder i form af eksempelvis trafik, industri og brændeovne, bidrager også til bybaggrund. Øvrige repræsentative VOC for jettuel, der ikke måles rutinemæssigt i bybaggrund er ethylcyclohe-

xan og n-hexadecan. Gennemsnitskoncentrationen for VOC, der rutinemæssigt måles i Københavns bybaggrund, var $5,3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i målekampagnen og dermed sammenlignelige med Københavns lufthavn på $5,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$. VOC repræsentative for jetfuel har også andre kilder, hvilket kan ses af tidsserierne for de enkelte stoffer. Således udviser n-octan og ethylcyclohexan høj grad af covarians, hvilket indikerer ens kilder (Figur B1.11). Det samme er tilfældet for xylen-isomererne, ethylbenzen og til dels benzen og toluen, der dog også udviser bidrag fra andre kilder end xylener og ethylbenzen. Isopren udviser på trods af sin relation til jetfuel ringe lighed med de øvrige stoffer, og antages derfor at være primært af biologisk oprindelse i den pågældende kampagne.



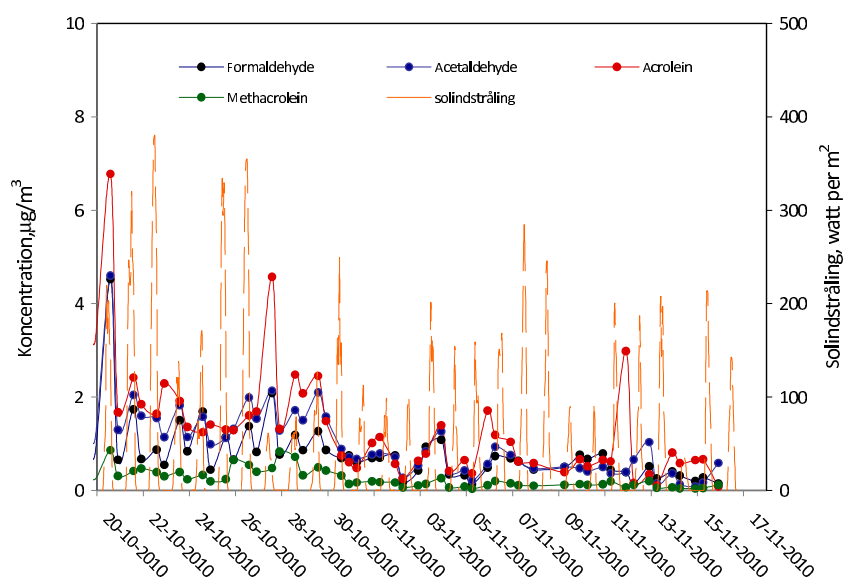
Figur B1.11. Udvalgte flygtige organiske stoffer (VOC) målt i den organiske målekampagne ved Station B4.

Benzen er kræftfremkaldende og er som den eneste VOC reguleret af EU med en luftkvalitetsgrænseværdi på $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (EU, 2008), der imidlertid ligger en størrelsesorden over gennemsnittet af de målte værdier.

Aldehyder udgør sammen med aromatiske hydrocarboner (benzen, toluen, ethylbenzen og xylenisomere) de mest udbredte flygtige stoffer i lufthavnen. Aldehydkoncentrationerne ligger gennemsnitligt på $0,1-1,4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i måleperioden, hvorimod enkeltmålinger op til $6,8$ og $4,6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ af henholdsvis acrolein og methacrolein er observeret. Da prøverne er opsamlet over 8 timer kan højere koncentrationer således forekomme i

korte tidsinterval, hvilket er kendt fra andre studier i forbindelse med flyemissioner (Brasseur et al., 1998; Sorokin and Arnold, 2006).

For flere af stofferne ses et aftagende niveau hen gennem målekampagnen (Figur B1.12), der kan hænge sammen med en aftagende koncentration af fotokemiske oxidanter, eksempelvis hydroxylradikaler (OH). Aldehyderne i Figur B1.13 kan dannes ved reaktioner mellem OH-radikalet og umættede VOC, der dels har naturlige kilder og dels emitteres fra flymotorer (Brasseur et al., 1998; Sorokin and Arnold, 2006), samt benzin- og dieseldrevne køretøjer (Kuykendall et al., 2009). I Figur B1.12 ses netop en aftagende solindstråling gennem kampagnen, hvilket har betydning for dannelse af fotokemiske oxidanter som OH-radikalet. Flere andre parametre har dog indflydelse på dannelsen af aldehyder.



Figur B1.12. Udvalgte flygtige organiske aldehydforbindelser samt global solindstråling (højre akse).

Acrolein og methacrolein kan give anledning til irritation. Således kan akut eksponering for acrolein resultere i næse-, hals- og øjenirritation (referencer i Woodruff et al., 2007). I et ældre kammerforsøg blev en række forsøgspersoner eksponeret for stigende koncentrationer af acrolein i 40 min (Weber-Tschopp et al., 1977), hvor der blev observeret nedsat respirationsrate, samt øjen- og næseirritation. Forfatterne foreslog en tærskelværdi for negative helbredseffekter på 200-700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. I et andet forsøg (Darley et al., 1960) blev forsøgspersoner eksponeret i 5 min for forskellige koncentrationer af acrolein, hvorunder forfatterne observerede øjenirritation ved koncentrationer ned til 140 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (laveste koncentration for observerbare negative effekter, LOAEL).

Prøveopsamling og analyse af $\text{PM}_{2,5}$ partikelfractionen

$\text{PM}_{2,5}$ partikelfractionen blev opsamlet på 150 mm kvartsfiltre (Advantec) med en High-Volume-Sampler (Digital DHA-80) med et flow på 500 l/min (720 m^3/dag) mhp. at kvantificere EC, OC, samt partikelbundne PAH'er. EC, OC og TC er bestemt ved en termisk/optisk-metode med en aerosol EC/OC analyzer (Sunset laboratories), der er kalibreret overfor

en methanstandard. Der analyseres en "filtersandwich" med for- og bagfiltre for at korrigere for positive artefakter.

En anden del af filtrene blev ekstraheret med toluen mhp. analyse af PAH og analyseret med gaskromatografi koblet med massespektrometri (GC-MS). Koncentrationerne for de enkelte PAH i prøven blev korrigeret for genfinding med en deuteriummærket standard og kvantificeret overfor ^{13}C mærkede interne standarder fratrukket blindprøve. I alt analyseres for 11 PAH, hvoraf benzofluoranthenisomerne er opgivet samlet.

Elementært (EC) og organisk kulstof (OC) i $\text{PM}_{2,5}$ partikelfractionen samt polycykliske aromatisk hydrocarboner

Kulstof (TC) opdeles i og kvantificeres som OC og EC, hvor sidstnævnte kan sidestilles med "sod", der måles rutinemæssigt i den fine partikelfraktion $\text{PM}_{2,5}$ i det landsdækkende overvågningsprogram (Ellermann et al., 2011). OC, EC samt EC/TC er nedenfor sammenlignet med landlig baggrund (Risø) og trafikeret gade (HCAB i København), der er en af Danmarks mest trafikerede gadestrækninger. Det ses af Tabel B1.3, at OC ved gate B4 er sammenlignelig med den trafikerede gade, hvorimod EC og EC/TC ligger mellem de to yderpunkter og tættest på landlig baggrund. Der er således et markant bidrag til partikulært OC i lufthavnen ift. baggrundsluften, hvilket dog ikke er nærmere analyseret.

I Tabel B1.3 vises resultaterne fra måling af 11 partikelbundne PAH'er, herunder benzo(a)pyren, og deres gennemsnitskoncentration under målekampagnen ved gate B4 og HCAB. Bemærk, at PM størrelsesfraktionerne er forskellige i de forskellige studier. I indeværende studie er $\text{PM}_{2,5}$ analyseret, mens rutinemålingerne på HCAB omfatter PM_{10} . Endelig er PAH-koncentrationerne sammenlignet med et italiensk studie i Leonardo Da Vinci lufthavnen i Rom, hvor der ikke er opgivet nogen PM afskæring, dvs. værdierne også er påvirket af partikler større end $10\ \mu\text{m}$. PAH dannes imidlertid under ufuldstændige forbrændingsreaktioner og findes primært i $\text{PM}_{2,5}$ fraktionen, hvorved studierne anses for sammenlignelige. Koncentrationerne ved gate B4 udgør ca. en tredjedel eller mindre af de tilsvarende på HCAB og Leonardo Da Vinci Lufthavn (dog er der to PAH, som blev fundet ved gate B4, som ikke blev fundet i studiet ved Leonardo Da Vinci Lufthavn, formodentligt fordi de har ligget under detektionsgrænsen).

Tabel B1.3. Partikelbundne polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) og elementært- (EC), organisk- (OC) samt total kulstof (TC) i Københavns lufthavn (gate B4) sammenlignet med HCAB, København og landlig baggrund på Risø, Nord for Roskilde i målekampagnen. Målingerne ved de to sidst nævnte målestationer er foretaget i forbindelse med Delprogram for luft under NOVANA (Ellermann et al., 2011). Endvidere vises data fra forpladsen på Leonardo Da Vinci Lufthavn i Rom fra januar-februar 2005 (Cavallo et al., 2006)

	Københavns lufthavn (B4)	København gade (HCAB)	Da Vinci Lufthavn	Baggrund (Risø)
PAH (ng/m³)	PM_{2,5}	PM₁₀	PM	
Chrysen	0,18	0,51	1,1	
benzo(a)anthracen	0,10	0,33	1,5	
Dibenzo(a,h)anthracen	0,02	0,07	0,0	
benzo(g,h,i)perylene	0,17	0,64	1,9	
Indenopyren	0,17	0,53	1,7	
benzo(e)pyren	0,13	0,33	0,5	
benzo(a)pyren	0,12	0,34	0,4	
benzo(b+j+k)fluoranthen	0,44	1,15	3,1	
Perylen	0,02	0,06	0,0	
Kulstof analyse (µg/m³)	PM_{2,5}	PM_{2,5}		PM_{2,5}
EC	1,16	2,61		0,42
OC	2,66	2,55		1,21
TC	3,82	5,16		1,63
EC/TC (dimensionsløs)	0,31	0,51		0,25

I det italienske målestudie fra Leonardo Da Vinci lufthavnen i Rom (Cavallo et al., 2006) er flygtige og partikelbundne PAH opgjort over fem arbejdsdage. Her blev der observeret højere koncentrationer af de fleste PAH'er på forpladsen end for tilsvarende forhold i indeværende studie. Bemærk dog, at de to studier ikke er helt sammenlignelige, da den italienske undersøgelse dækkede en kortere måleperiode og blev udført på en anden årstid.

Benzo(a)pyren er en kræftfremkaldende PAH reguleret af EU med en (års)målværdi i luft 1 ng/m³, der ikke er overskredet i de tre omtalte studier. Herudover er følgende PAH'er klassificeret som sandsynlige kræftfremkaldende stoffer for mennesker af det amerikanske EPA (Environmental Protection Agency): benzo(a)anthracen, benzo(b)fluoranthen, benzo(k)fluoranthen, chrysen, dibenzo(a,h)-anthracen samt indenopyren, for hvilke der ikke er nogen grænseværdier. Ingen af disse PAH overskrider dog koncentrationerne i den trafikerede gade i København (HCAB).

Delkonklusion

Hovedparten af de målte luftforureningskomponenter på forpladsen ligger på eller under de niveauer, som måles på HCAB. Endvidere overholdes grænseværdier og målværdier for luftkvalitet for alle de luftforureningskomponenter, hvor der eksisterer målsætninger.

Antallet af ultrafine partikler er den væsentligste afvigelse fra dette billede, da koncentrationen målt på forpladsen ligger omkring to til tre gange højere end på HCAB. Der eksisterer ingen luftkvalitetsgrænseværdier for antallet af ultrafine partikler.

Måling af SO₂ ved Station B4 indikerer, at det relativt høje svovlindhold i jetfuel er årsagen til en del af de udledte partikler fra flyene. Dette underbygges af litteraturundersøgelse.

I målekampagnen fra den. 20. oktober til 17. november 2010 blev der opsamlet og målt flygtige og partikulære organiske stoffer på forpladsen i Københavns lufthavn ved gate B4. VOC er på Kastrup Lufthavn målt i niveau med bybaggrundsluft, dog ses forhøjede koncentrationer af repræsentative VOC for jetfuel, hvilket er mest tydeligt for n-octan. De tre isomerer af trimethylbenzen er ligeledes en anelse forhøjede i forhold til bybaggrund. Aldehyder, herunder acrolein, der vides at kunne give anledning til sensorisk irritation, ligger generelt betragteligt under effekt-niveauerne. Imidlertid forekommer enkeltmålinger på op til 6,8 µg/m³, opsamlet med midlingstid over 8 timer. Højere koncentrationer kan derfor forekomme i kortere tidsrum.

På Kastrup Lufthavn måles OC i partikelfractionen (PM_{2,5}), der er sammenlignelig med niveauet for stærkt trafikerede gader i København (HCAB), mens EC (svarer til sod) og andelen af EC i totalt partikulært kulstof (EC/TC) ligger på et niveau mellem landlig baggrundsluft og trafikeret gade. Der er derfor et markant bidrag til OC i forbindelse med Kastrup Lufthavn. Dette bidrag er ikke nærmere identificeret.

De enkelte partikelbundne PAH på forpladsen ved gate B4 er sammenlignet med HCAB i København og Leonardo Da Vinci lufthavnen i Rom. De enkelte koncentrationer af PAH er ca. en tredjedel af koncentrationen på HCAB i samme periode, og fra 6-31 % af koncentrationerne målt på Leonardo Da Vinci Lufthavn i Rom (Cavallo et al., 2006), på nær perylen og dibenzo(a,h)anthracen, der forekommer i meget lave koncentrationer i Rom.

Det er kun benzen og benzo[a]pyren, som er reguleret via EU's luftkvalitetsdirektiver (EU, 2005 og 2008). Koncentrationerne af disse stoffer i Københavns Lufthavn overskrider i målekampagnen ikke grænseværdien for benzen (5 µg/m³) og målværdien for benzo[a]pyren (1 ng/m³).

Referencer

Agrawal, H., Sawant, A.A., Jansen, K., Miller, J.W. & Cocker, D.R. (2008): Characterization of chemical and particulate emissions from aircraft engines.

Cavallo, D., Cinzia, L. U., Carelli, G., Iavicoli, I., Ciervo, A., Perniconi, B., Rondinone, B., Gismondi, M. & Iavicoli, S., 2006: Occupational exposure in airport personnel: Characterization and evaluation of genotoxic and oxidative effects. *Toxicology* 223, pp. 26-35.

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

Ellermann, T., Nordstrøm, C., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M. & Jensen, S.S., 2011. The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2010. National Environmental Research Institute, Aarhus University. 55 pp. -NERI Technical Report No. 836.

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

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

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

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

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

Schröder, F., Petzold, A., & Kärcher, B. (1998): Ultrafine particulate jet aircraft emissions depending on sulfur content and contrail processing. *J. Aerosol Sci.* Vol. 29, pp. S561-s562.

Sigma Aldrich, 2011:
http://www.sigmaaldrich.com/etc/medialib/docs/Supelco/Application_Notes/radiello_f1_f2.Par.0001.File.dat/radiello_f1_f2.pdf

Skov, H., Hansen, A.B., Lorenzen, G., Andersen, H.V., Løfstrøm, P., & Christensen, C.S., 2001. Benzene exposure and the effect of traffic pollution in Copenhagen, Denmark. *Atmospheric Environment* 35, 2463-2471.

Weber-Tschopp, A., Fischer, T., Gierer, R., Grandjean, E., 1977. Experimentelle reizwirkungen von akrolein auf den menschen. *International Archives of Occupational Environmental Health* 40(2), 117- 30.

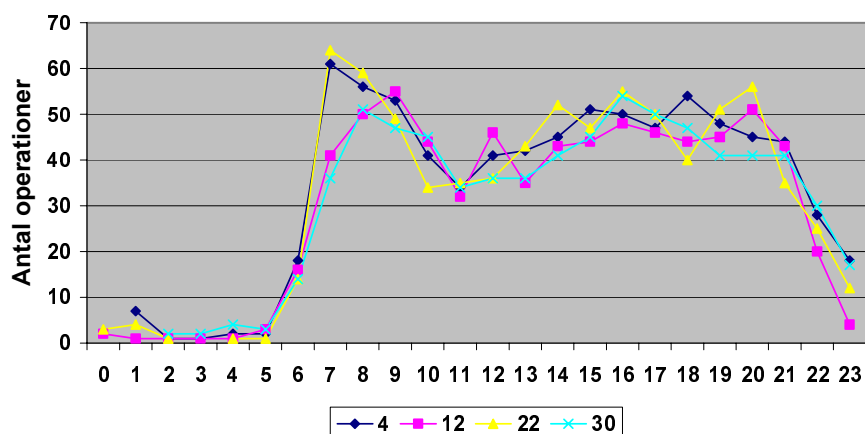
Bilag 2: Emissionsopgørelse

Indledning

Emissionsopgørelsen for lufthavnen indeholder brændstofforbrug og emissioner fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpemotorer (APU, Auxiliary Power Unit), handlingsudstyr og vejgående køretøjer. Opgørelsen er detaljeret opdelt i et 5x5 m gridsystem, og indeholder hver celledes 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.

Opgørelsens fremgangsmåde har været at fremskaffe detaljerede bestands- og driftsinformationer for fly, handlingsudstyr 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 B2.1). For flyene er motorspecifikke emissionsfaktorer beregnet og for handlingsudstyret 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 B2.2. 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 B2.1. ICAO opdeler den samlede før off block APU tid i "APU start up" og "Boarding", der svarer til forskellige APU motorbelastninger. Antal flymotorer (hovedmotorer) for hver af flytyperne, der benyttes i lufthavnen kan ses i Tabel B2.12.

Tabel B2.1. Tidsrum (sekunder) for forskellige driftsfaser for flyenes APU motor.

	Ankomst	APU opstart	Boarding	Under push-back	Hovedmotorstart
APU belastning →	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 samlet set lidt større end de normale 5 minutters APU drift efter on-block og 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 motorer 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 motoren kører ved høj belastning.

Opstart af hovedmotorer

Figur B2.1 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 Tabel B2.13. 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. Handlingskemaet, der er vist i Tabel B2.2, 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 Tabel B2.12.

Tabel B2.2. Grejtyper, driftstider og lastfaktorer for handlingsmateriellet i Københavns Lufthavn

		Flygruppe				
		B	C	D	E	Alle
Landing	Handlingsperiode $\Delta H \rightarrow$	15	20	30	40	
		Grejtid ΔT (min)				Lastfaktor
	Bagagetraktor	9	10	15	25	0,15
	Bagagebånd	10	20	20	20	0,15
	Pushback ved standplads	0	0	0	0	0,15
	Pushback i fart	0	0	0	0	0,75
	Container loader	0	15	27,5	35	0,45
	Container transportør	0	15	27,5	35	0,35
	Fuel (dispenser truck)	10	15	30	50 ^a	0,1
	Fuel (refueling truck)	10	15	30	50 ^a	0,1
	Cleaning highloader	0	0	10	15	0,45
	Cargo/Post traktor	0	5	5	5	0,15
	Toiletbil	0	0	0	0	0,25
	Catering	1	3	5	5	0,1/0,2/0,22/0,22 ^b
	Vandbil	0	0	0	0	0,25
Start	Handlingsperiode $\Delta H \rightarrow$	15	20	30	40	
		Grejtid ΔT (min)				Lastfaktor
	Bagagetraktor	9	10	15	25	0,15
	Bagagebånd	10	20	20	20	0,15
	Push-back ved standplads	10	10	10	10	0,15
	Push-back i fart	0	0	0	0	0,75
	Container loader	0	15	27,5	35	0,45
	Container transportør	0	15	27,5	35	0,35
	Fuel (dispenser truck)	0	0	0	0	0,1
	Fuel (refueling truck)	0	0	0	0	0,1
	Cleaning highloader	0	0	10	15	0,45
	Cargo/Post traktor	0	5	5	5	0,15
	Toiletbil	0	10	20	20	0,25
	Catering	0	0	0	0	0,1/0,2/0,22/0,22 ^b
	Vandbil	0	7,5	15	15	0,25

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

^b For flygrupperne B/C/D/E

Det er antaget, at toiletbil og vandbil bruges ved handling før start, mens catering og brændstoftpåfyldning af flyene sker ved handling efter landing. Der benyttes tankvogn til brændstoftpåfyldning af flyene på de standpladser, hvor der ikke er lagt brændstoftør. Disse standpladsnumre er angivet i Tabel B2.13.

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 Tabel B2.13.

En liste med handlingsselskab for de enkelte flyoperatører er vist i Tabel B2.14. Handlingsselskaberne har også angivet samlede lister over grej, der benyttes i Københavns Lufthavn med angivelse af grejtypenummer, brændstoftype, motorstørrelse og årgang/motornorm. Listerne, der omfatter 643 forskellige handlingsskøretøjer, er dog ikke vist i denne rapport.

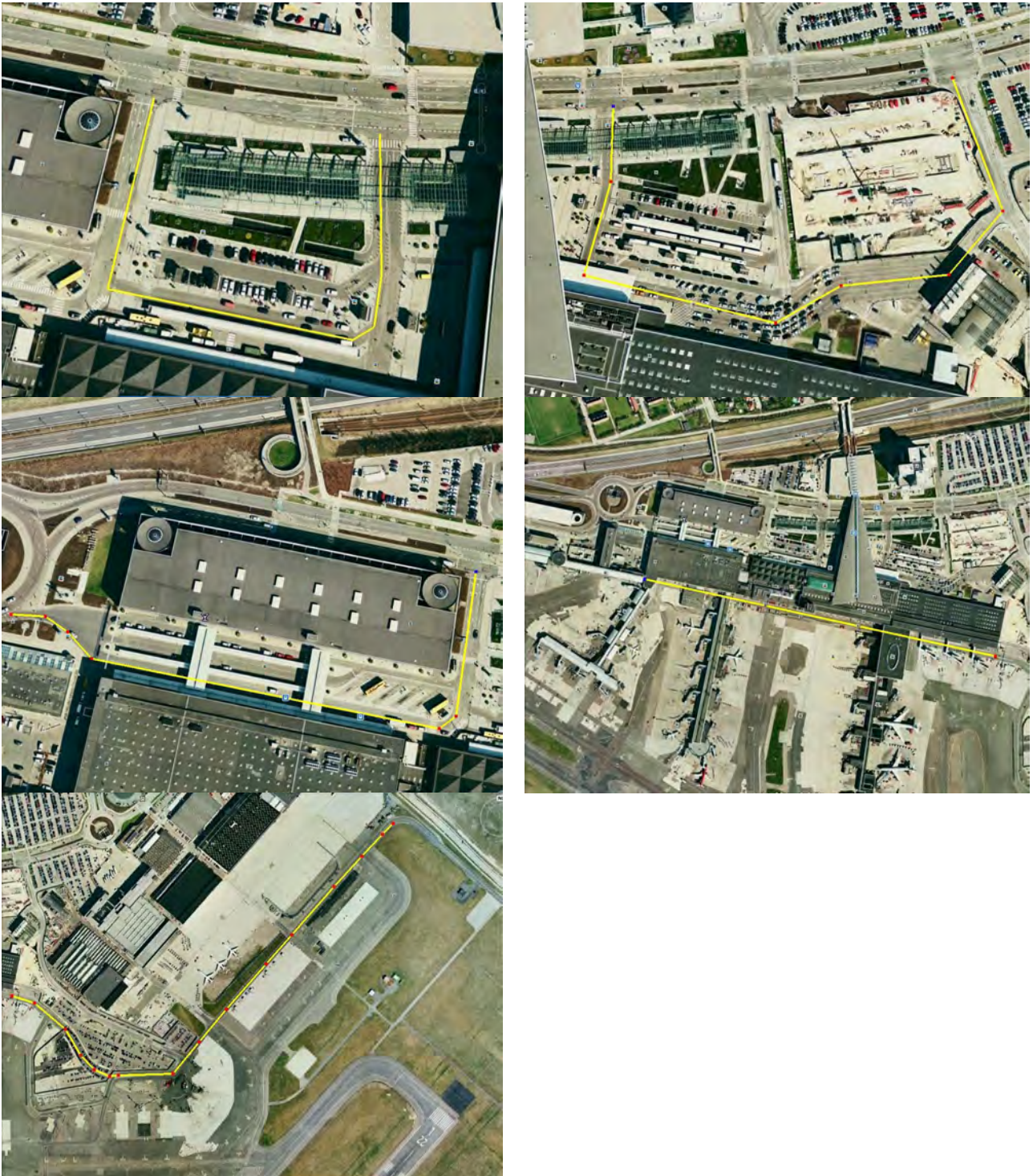
Kørende trafik

Københavns Lufthavne A/S har tilvejebragt trafiktællinger i 15 minutters intervaller for et helt døgn optalt ud fra overvågningsbilleder i lufthavnen for den kørende trafik (Tabel B2.3). Kørestrækningen for hver af de fem overvågningszoner er opmålt fra satellitbilleder (Figur B2.3).

Tabel B2.3. Resultater fra trafikoptælling på udvalgte trafikovervågningszoner i og omkring Kastrup Lufthavn.

Kameraplacering	Strækning km	Tomgang Min	Hastighed Km/h	Antal køretøjer						
				Personbil	Vare- bil/Minibus	Lastbil	Rutebus	Turistbus	Lastbil/Bus	Bagage- vogn
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 B2.3. 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").

Emissionsfaktorer (g/km) er taget fra den fælles-europæiske COPERT IV model (EMEP/EEA, 2009), der bruges til at beregne den officielle danske emissionsopgørelse for vejtrafik. Emissionsfaktorerne er efterfølgende omregnet til g/min til brug for beregningerne af tomgangsemissionen. Til at dække emissionsberegningerne 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.

Digitalisering af aktivitetsdata

Tabel B2.4 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 B2.4. Operationstyper, motortyper og motorbelastning for brug af motorer i Københavns Lufthavn

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

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 B2.1 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 et fælles start/slutpunkt for passende grupper af standpladsers videre taxitur ad præferencerulleveje til/fra start/landingsbanerne.

Hovedmotorernes længdemæssige placering henregnes til flyets midtpunkt. Flydimensionerne for de forskellige flytyper fremgår af Tabel B2.12.

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 støjeregninger (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 taxihastigheden 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 B2.1). APU motorens 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 Tabel B2.12.

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 B2.1. 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 handlings-selskaberne anslås at være i brug i ca. 10 minutter op til flyets off-block tidspunkt ved de standpladser, hvor flyene skal trækkes ud.

Til brug for modelberegningerne antages ud fra handlingsselskabernes oplysninger, at handlingsaktiviteterne foregår på højre side af flyet, indenfor et areal der udspændes af flyets længde og højre vingebredde.

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 metoden, der anvises af ICAO's Environmental Protection Working Group (ICAO, 2008). Partikelbidragene skal beregnes for hhv. sod og kulbrinter i udstødningen samt flybrændstoffets indhold af svovl.

Partikelbidrag fra sod

Beregningen af de ikke-flygtige (non volatile) partikelemissioner relateret til motorernes sodemission er detaljeret beskrevet i ICAO (2008). 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 emissionsdata-

base, 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 ≤ 30⁹.

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

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:

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

EI_{PMvol} = 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):

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

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

EI_{PMvol} = 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:

⁹ I praksis er SN tallet mindre end 30 for alle flymotorer der bruges i lufthavnen

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

$EI_{PMvol-HC}$ = 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:

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

$EI_{PMvols-FSC}$ = 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 (2008) 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 B2.7 fordelt på de forskellige taxioperationstyper, landing og take off.

APU

Emissionsfaktorer for CO, HC, NO_x og partikler angivet i kg/h for APU motorer kommer fra ICAO (2007). Faktorer for fuelforbrug er anvist af Janiche (2010). NO₂ fraktionen af samlet NO_x kommer fra målinger udført af Schäfer et al. (2003). Faktorerne er vist i Tabel B2.15. APU-faktorerne repræsenterer forskellige flystørrelser angivet ved sædekapa-citet, og gamle/nye flytyper som vist i Tabel B2.5. Derudover detaljeres faktorerne efter APU'ens motorbelastning (jf. Tabel B2.1). Ud fra JP Air-line Fleets 2009/2010 databasens oplysninger om sædekapa-citet for flye-ne i lufthavnen samt en generel vurdering af flytypens alder, inddeles flyene i Københavns Lufthavn i de relevante APU kategorier. Denne inddeling er vist i Tabel B2.12.

Tabel B2.5. Gruppering af APU motorer efter sædekapa-citet 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

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):

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

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

P = motorstørrelse (kN)

For nemheds skyld fordeles HC emissionerne ligeligt over APU tidsintervallet for motoropstart, der er vist i Tabel B2.1. 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 B2.1)

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 vægtede gennemsnit for alle flyene vist i Tabel B2.7 fordelt på de forskellige APU operationstyper.

Handlingskøretøjer

Generelle emissionsfaktorer for motorerne der benyttes af de diesel- og benzindrevne handlingskøretøjer er opstillet i Tabel B2.16. For dieselmotorer er faktorerne opdelt iht. EU's emissionslovgivning for hhv. non road (Stage I-IV) og vejtransport (Euro I-V). Tabel B2.6 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 Tabel B2.16.

Tabel B2.6. 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 B2.2)

ΔH = Samlet handlingsperiode pr. flygruppe (Tabel B2.2)

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 benzinmotorer 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 bagagetraktorerers motorteknologi 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 vejtrafik¹⁰.

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 B2.7 for hhv. ankomst og afgang. Raterne angives endvidere separat for pushback traktorer ved standplads og i fart.

Afledte emissionsrater for hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer

Tabel B2.7 viser de afledte emissionsrater og brændstofrelaterede emissionsfaktorer (udledning per sekund) beregnet som vægtet gennemsnit for alle hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn. Tabel B2.8 viser emissionsraterne per kg forbrændt brændstof.

¹⁰ 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.

Table B2.7. Afledte emissionsrater (også kaldet emissionsfaktorer) for hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn

Motor	Operationstype	Motorbelastning	HC g/s	CO g/s	NO _x g/s	NO ₂ g/s	PM g/s	Fuel g/s
APU	APU ankomst	Normal running	0,019	0,135	0,234	0,080	0,033	28,2
APU	APU opstart	Start-up	0,376	0,668	0,114	0,039	0,007	19,2
APU	APU boarding	Normal running	0,019	0,135	0,239	0,082	0,033	28,5
APU	APU hovedmotorstart	High load	0,018	0,145	0,350	0,120	0,054	38,4
APU	APU ved push back	Normal running	0,020	0,126	0,238	0,081	0,038	27,9
Handling	Handling ankomst	GSE	0,017	0,064	0,109	0,013	0,007	3,3
Handling	Handling afgang	GSE	0,024	0,086	0,155	0,017	0,010	4,2
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle	0,537	4,960	0,938	0,295	0,025	215,6
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle	0,518	4,754	0,887	0,279	0,024	205,1
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)	Idle	0,527	4,985	0,958	0,302	0,025	220,7
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)	Idle	0,513	4,895	0,953	0,300	0,025	218,1
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle	0,588	4,592	0,801	0,252	0,023	187,2
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off	0,140	1,160	51,147	16,111	0,350	2058,0
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle	0,520	4,631	0,858	0,270	0,023	198,6
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off	0,139	1,182	51,763	16,305	0,353	2103,0
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle	7,663	5,782	1,140	0,359	0,027	258,1
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle	0,281	3,121	0,467	0,147	0,011	111,9
Push back	Push back i fart	GSE	0,015	0,065	0,267	0,030	0,009	7,5
Push back	Push back ved standplads	GSE	0,003	0,013	0,053	0,006	0,002	1,5

Table B2.8. Afledte brændstofrelaterede emissionsfaktorer for hovedmotorer, APU og handlingskøretøjer i Københavns Lufthavn.

Motor	Operationstype	Motorbelastning	HC g/kg fuel	CO g/ kg fuel	NO _x g/ kg fuel	NO ₂ g/ kg fuel	PM g/ kg fuel
APU	APU ankomst	Normal running	0,663	4,811	8,325	2,847	1,155
APU	APU opstart	Start-up	19,539	34,734	5,929	2,028	0,339
APU	APU boarding	Normal running	0,663	4,726	8,379	2,866	1,154
APU	APU hovedmotorstart	High load	0,477	3,770	9,112	3,116	1,412
APU	APU ved push back	Normal running	0,722	4,530	8,536	2,919	1,364
Handling	Handling ankomst	GSE	5,246	19,400	32,949	3,791	2,206
Handling	Handling afgang	GSE	5,563	20,162	36,487	4,041	2,294
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle	2,489	23,007	4,350	1,370	0,114
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle	2,526	23,179	4,325	1,362	0,117
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)	Idle	2,387	22,586	4,342	1,368	0,112
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)	Idle	2,353	22,440	4,369	1,376	0,115
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle	3,141	24,523	4,275	1,347	0,121
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off	0,068	0,564	24,853	7,829	0,170
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle	2,620	23,317	4,319	1,361	0,118
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off	0,066	0,562	24,614	7,753	0,168
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle	29,684	22,397	4,414	1,391	0,105
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle	2,511	27,891	4,177	1,316	0,100
Push back	Push back i fart	GSE	2,037	8,651	35,689	4,027	1,239
Push back	Push back ved standplads	GSE	2,021	8,612	35,517	4,010	1,234

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.

Table B2.9. Emissionsfaktorer til brug for emissionsopgørelsen for de fem overvågningszoner

	Enhed	Personbil-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
CO ₂	g/min	60,503	69,575	86,479	258,727	274,405	34,146
SO ₂	g/min	0,000	0,000	0,001	0,002	0,002	0,000
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	
CO ₂	g/km	242,013	278,301	345,918	1552,364	1646,428	
SO ₂	g/km	0,002	0,002	0,002	0,010	0,010	
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
CO ₂	g/km		175,509	228,668	828,576	743,609	119,771
SO ₂	g/km		0,001	0,001	0,005	0,005	0,001
Fuel	MJ/km		2,393	3,096	11,197	10,049	1,628

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 handlingsudstyr 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) bruges i de videre spredningsberegninger 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 B2.3)

P = Område (kameraplacering, Tabel B2.3)

Ved kørsel på strækningerne angivet i Tabel B2.3 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 B2.3)

P = Område (kameraplacering, Tabel B2.3)

Emissionstotalerne beregnes for timeintervaller over døgnet og placeres efterfølgende i spredningsmodellen til den videre beregning af luftkvaliteten i lufthavnen.

Resultater

Totale emissioner og brændstofforbrug for hele lufthavnen

Tabel B2.10 viser resultaterne for brændstofforbrug og emissioner for et døgn i undersøgelsen. For fly og handlingsudstyr er værdierne taget som et gennemsnit af resultaterne for de fire døgn, der er indhentet operationsdata for.

Tabel B2.10. Emissioner og brændstofforbrug for hele lufthavnen kildeopdelte for et døgn i undersøgelsen

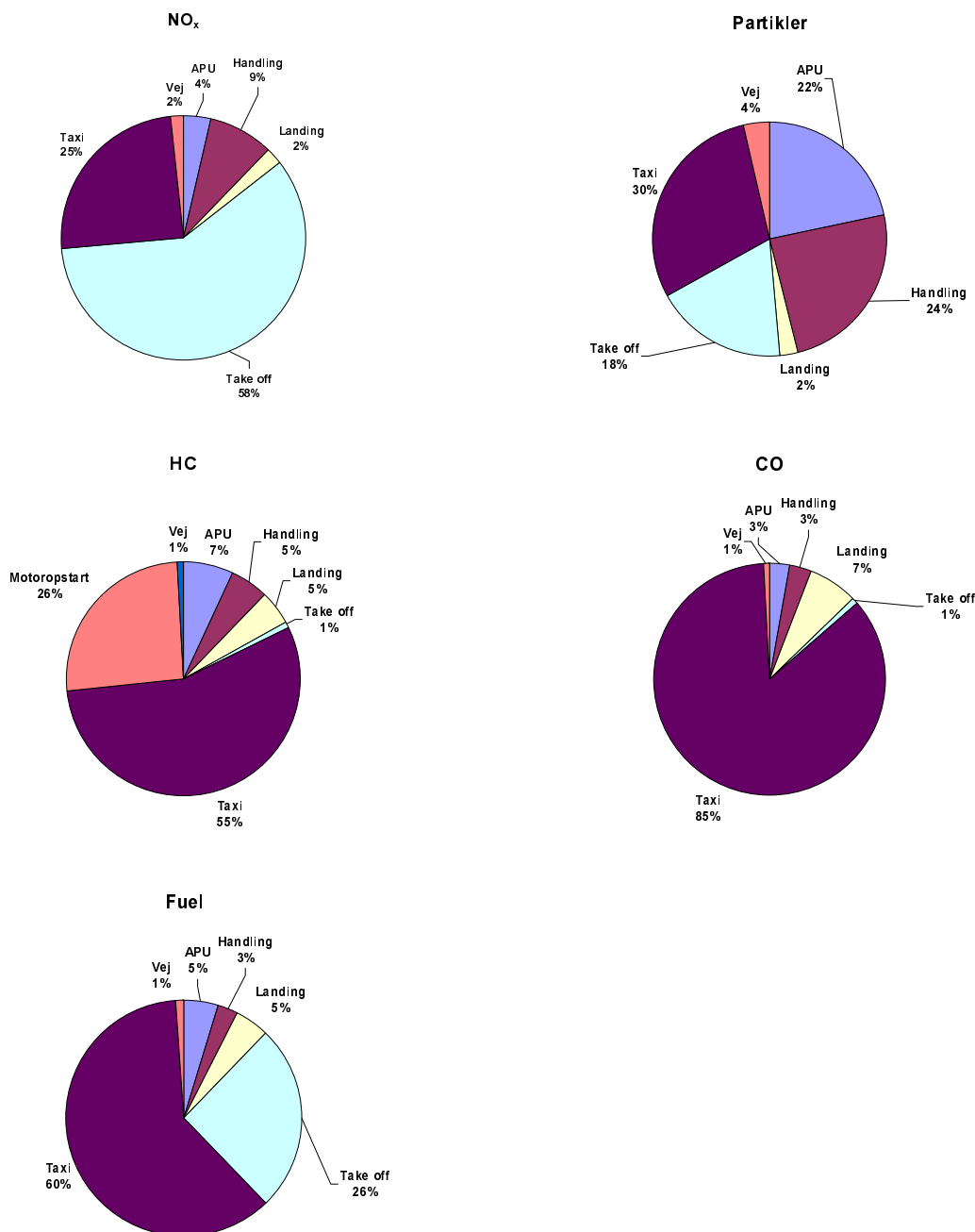
Kilde	Aktivitet	Motordrift	HC kg	CO kg	NO _x Kg	NO ₂ kg	PM kg	Fuel kg	Fuel GJ
APU	APU ankomst	Normal running	1,8	13,1	22,6	7,7	3,1	2716	118,2
APU	APU opstart	Start-up	21,8	38,7	6,6	2,3	0,4	1115	48,5
APU	APU boarding	Normal running	1,3	9,5	16,9	5,8	2,3	2013	87,6
APU	APU hovedmotorstart	High load	0,2	1,8	4,4	1,5	0,7	478	20,8
APU	APU ved push back	Normal running	0,3	2,2	4,1	1,4	0,7	479	20,9
Handling	Handling ankomst	GSE	7,8	29,0	49,3	5,7	3,3	1496	63,9
Handling	Handling afgang	GSE	10,6	38,4	69,5	7,7	4,4	1905	81,4
Hovedmotor	Taxi ankomst (taxi way)	Idle	62,1	574,4	108,6	34,2	2,8	24966	1086,0
Hovedmotor	Taxi afgang (taxi way)	Idle	56,8	520,8	97,2	30,6	2,6	22469	977,4
Hovedmotor	Taxi afgang (queing)	Idle	84,0	794,5	152,7	48,1	3,9	35177	1530,2
Hovedmotor	Landing (runway deceleration)	Idle	4,6	43,4	8,5	2,7	0,2	1935	84,2
Hovedmotor	Landing (runway taxi)	Idle	4,1	32,4	5,6	1,8	0,2	1320	57,4
Hovedmotor	Take off (runway)	Take off	1,9	16,0	706,3	222,5	4,8	28421	1236,3
Hovedmotor	Landing (descent)	Idle	9,4	83,3	15,4	4,9	0,4	3572	155,4
Hovedmotor	Take off (climb out)	Take off	0,5	4,3	186,3	58,7	1,3	7571	329,3
Hovedmotor	Hovedmotor ved motorstart	Idle	95,3	71,9	14,2	4,5	0,3	3210	139,6
Hovedmotor	Hovedmotor ved push back	Idle	1,2	13,7	2,1	0,6	0,0	492	21,4
Push back	Push back moving	GSE	0,3	1,1	4,6	0,5	0,2	129	5,5
Push back	Push back ved standplads	GSE	0,5	2,0	8,2	0,9	0,3	232	9,9
Total			364,5	2290,5	1483,1	442,0	32,0	139694	6073,7

Brændstofforbrug og emissioner for den kørende trafik beregnet for et døgn i undersøgelsens fem områder er vist i Tabel B2.11. Set i forhold til totalerne fra Tabel B2.10 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 3,5 %.

Tabel B2.11. Emissioner for kørende trafik for et enkelt døgn i undersøgelsens fem områder.

	CO kg	NO _x kg	NO ₂ kg	HC kg	PM kg	Energi GJ
Hilton	4,5	9,3	3,0	0,6	0,5	32,0
Busterminal, T2	3,6	3,3	0,5	0,5	0,1	7,9
Drop Off T3	1,4	0,5	0,1	0,2	0,0	2,5
Finger B-C	6,4	3,8	0,6	0,8	0,2	8,5
Check Øst	5,0	6,7	1,1	0,7	0,3	13,6
Total	20,9	23,5	5,3	2,8	1,2	64,5

Figur B2.4 viser procentfordelingen af totale emissioner og brændstofforbrug for hovedmotorer, APU, handlingsudstyr og vejgående trafik for et gennemsnitligt døgn i undersøgelsen.

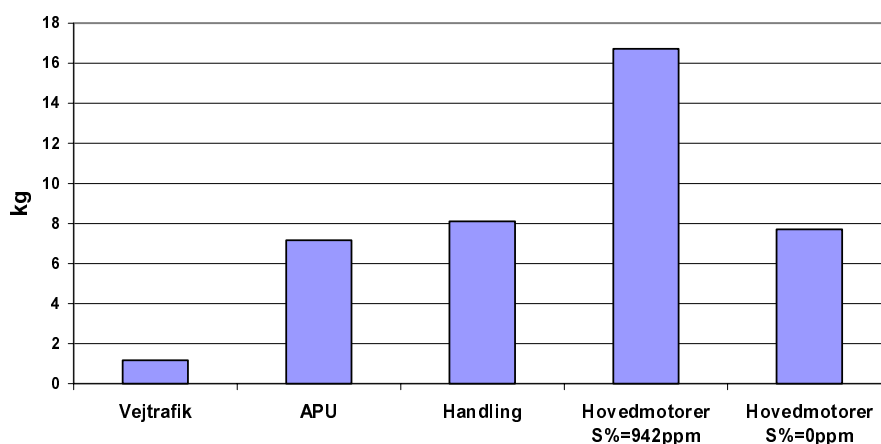


FigurB2.4. Procentfordeling af totale emissioner og brændstofforbrug i hele lufthavnen for hovedmotorer, APU, handlingsudstyr og vejtrafik for et gennemsnitligt døgn i undersøgelsen

De beregnede emissionsniveauer kan generelt forklares ud fra størrelsen af de brændstoffrelaterede emissionsfaktorer vist i Tabel B2.8 og de beregnede energiforbrug vist i Tabel B2.10. Den store emission af HC og

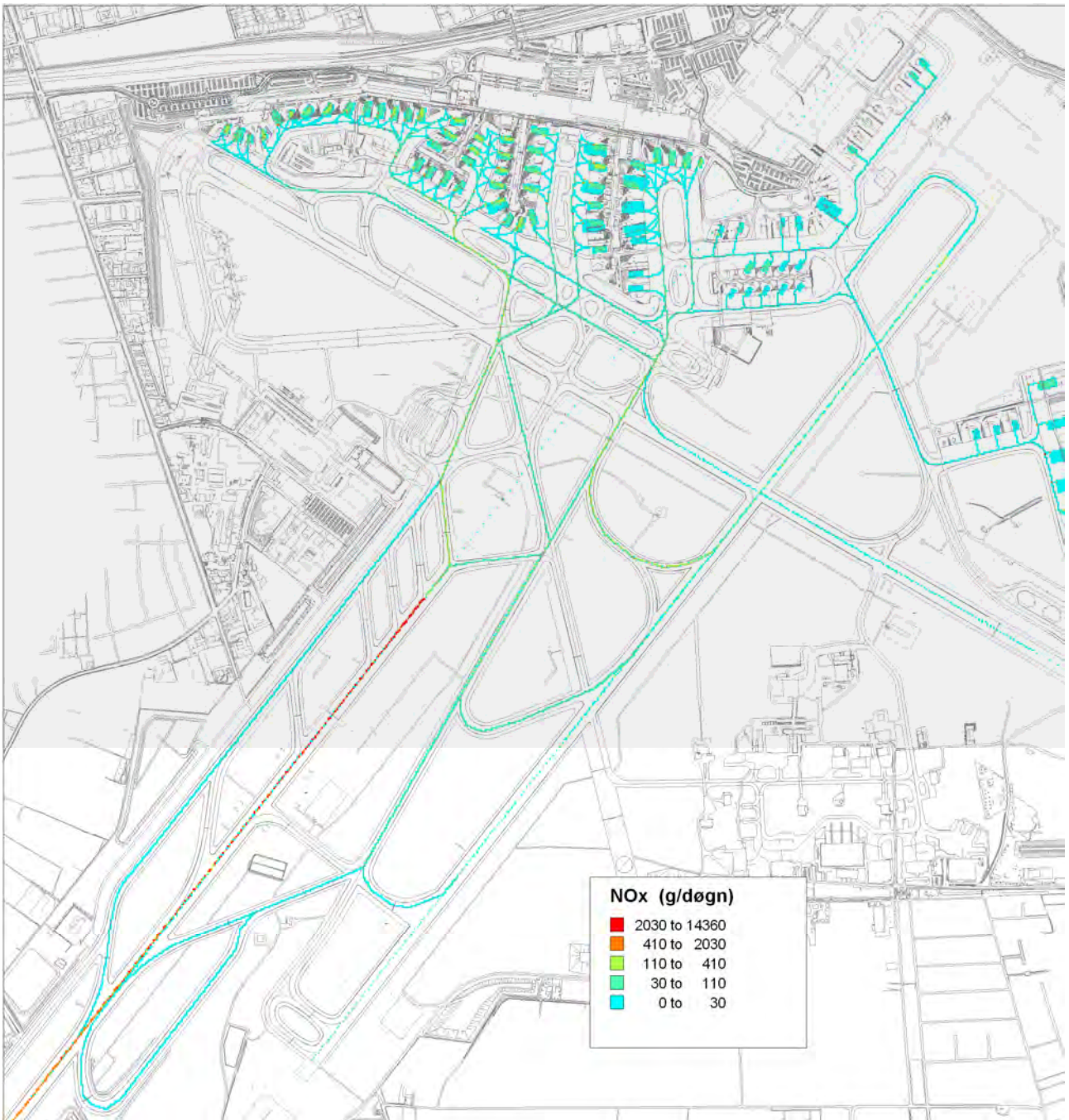
CO fra hovedmotorerne udledes specielt ved lav motorbelastning under taxifart, hvor forbrændingen er mindre god, og ved motoropstart (HC), hvor en stor mængde uforbrændt flybrændstof udledes direkte. Partikelemissionerne fra handlingsmaskiner (handlingsudstyr og push back traktor) og APU motorer er store set i forhold til deres samlede energiforbrug, og emissionsniveauerne afspejler de generelt høje emissionsfaktorer for APU og dieselmaskiner, der bruges i handlingssituationerne. Ved take off bliver NO_x-emissionerne fra hovedmotorer særligt store pga. motorens høje forbrændingstemperatur.

Figur B2.5 viser partikelemissionen 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 jetmotorenes 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 B2.5, at emissionsbidraget fra den kørende trafik i de fem undersøgte områder er meget lille.

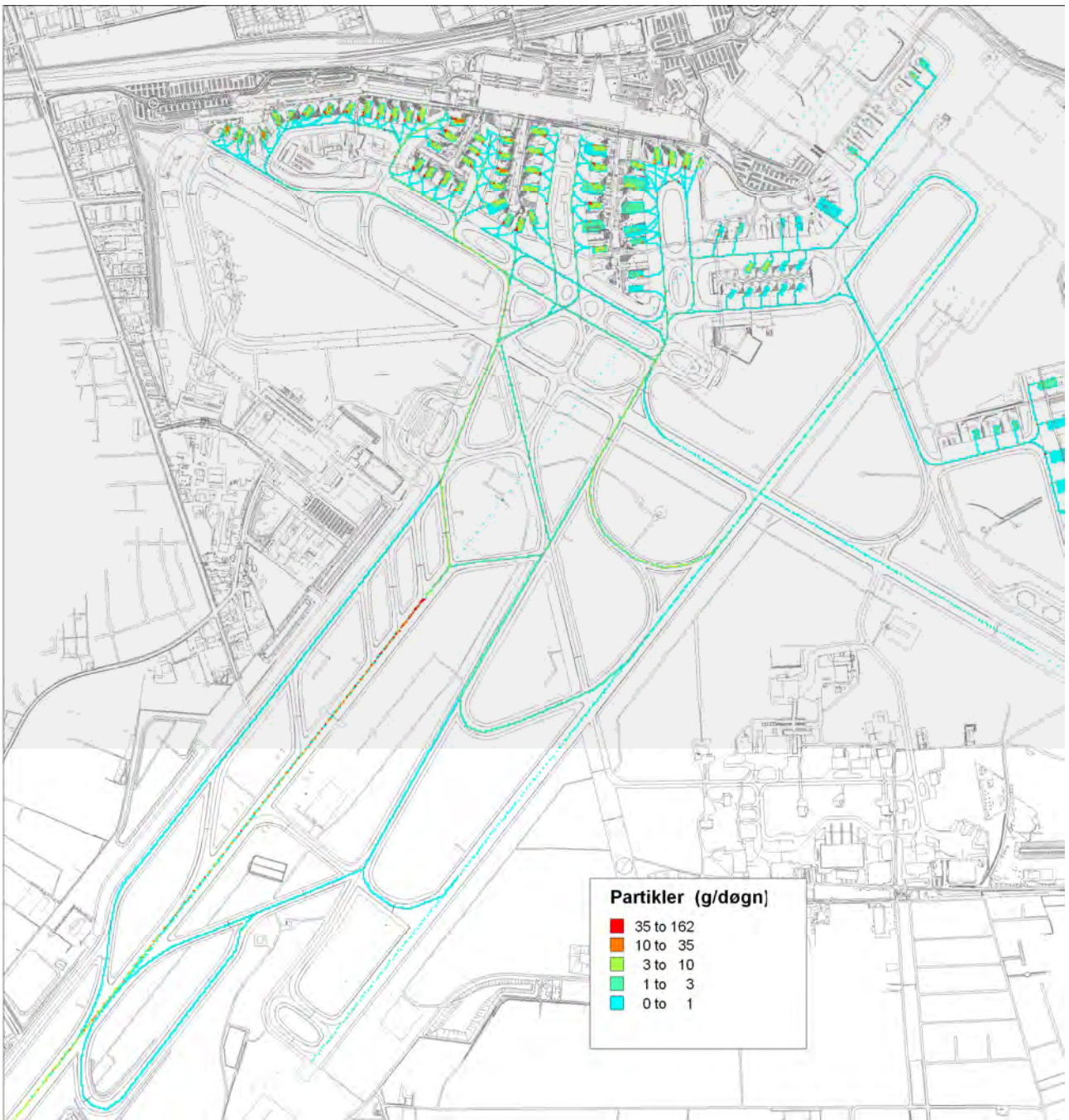


Figur B2.5. Partikelemission for et døgn i Københavns Lufthavn fordelt på hovedkilder

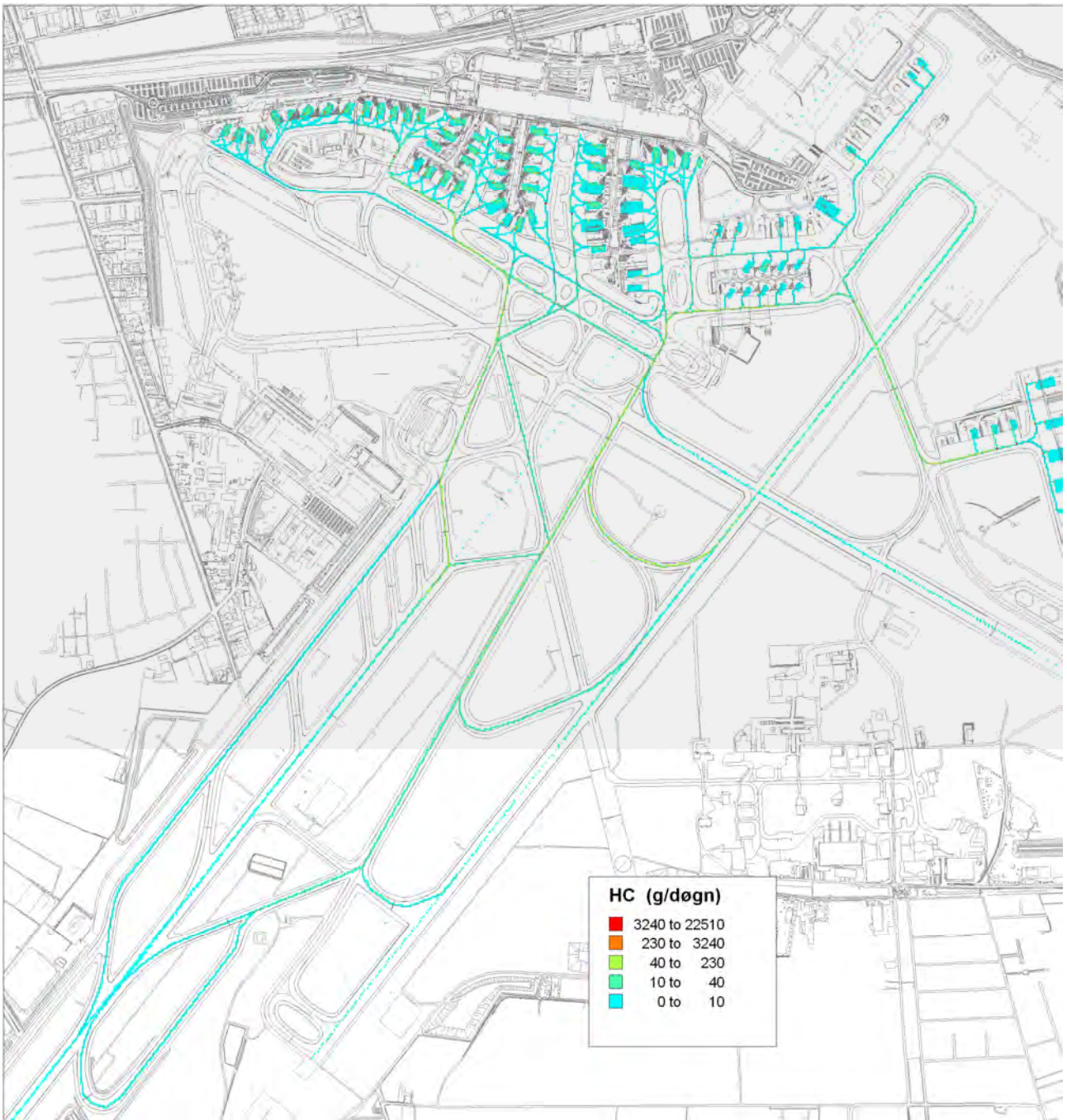
Figur B2.6-B2.9 viser den geografiske emissionsfordeling for hhv. NO_x, partikler, HC og CO for hele lufthavnen for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



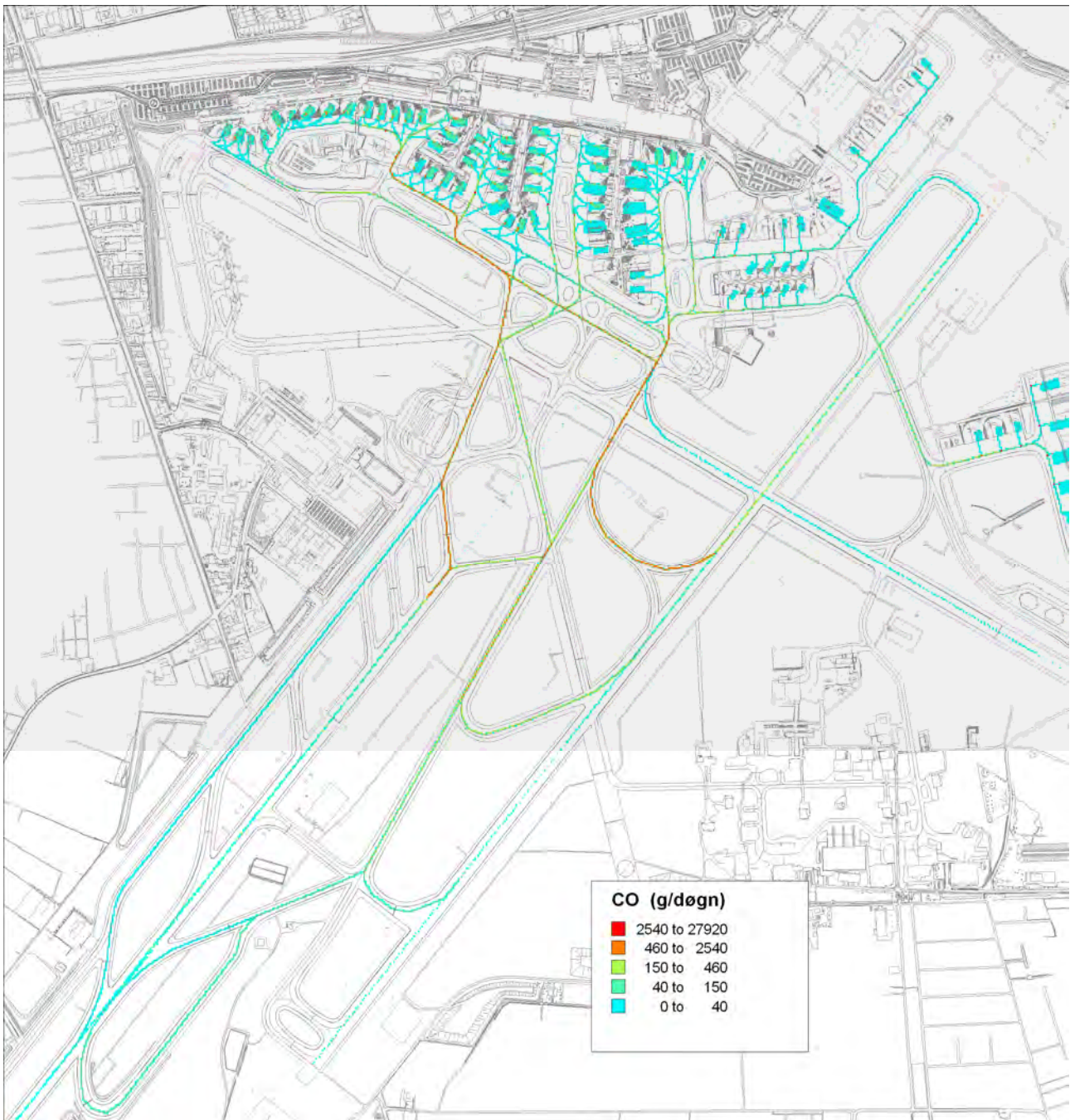
Figur B2.6. Totale emissioner af NO_x for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



Figur B2.7. Totale partikelemissioner for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22.



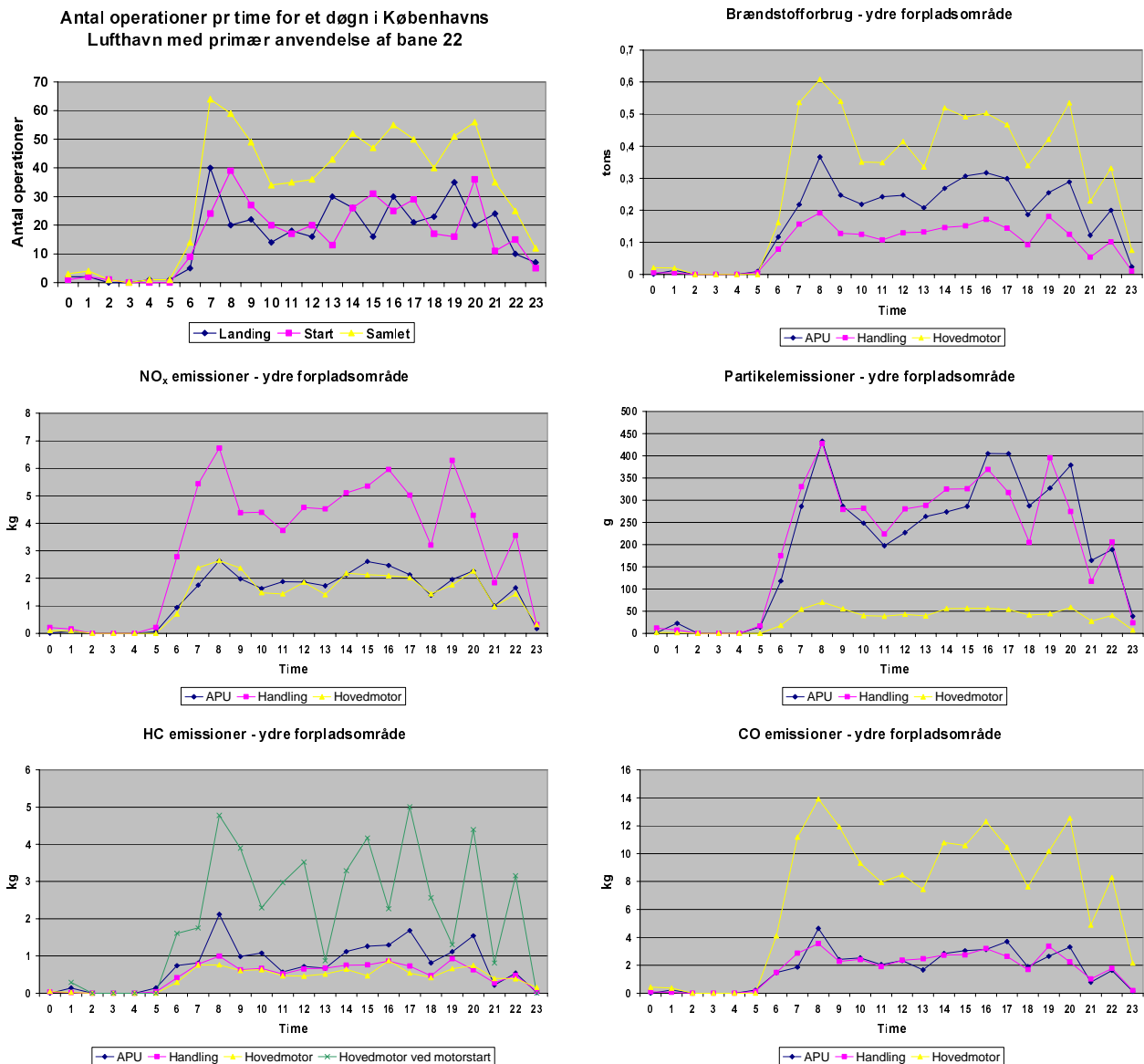
Figur B2.8. Totale emissioner af HC for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22



Figur B2. 9. Totale emissioner af CO for et døgn med fortrinsvis anvendelse af bane 22

Totale emissioner og brændstofforbrug i forpladsområdet

Figur B2.10 viser timeopdelt brændstofforbrug og timeopdelte emissioner af NO_x , partikel, HC og CO for et udsnit af forpladsområdet 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 B2.10 samlet og fordelt på starter og landinger.



Figur B2.10. Timefordelte emissioner og brændstofforbrug i "ydre forpladsområde" for hovedmotorer, APU og handlingsudstyr for et døgn med primær brug af bane 22

Handlingskøretøjer og APU er klart de største kilder til partikelemmissionen. Hovedårsagen er de høje emissionsfaktorer for APU og dieseldrevet handlingsudstyr, da disse to kilders energiforbrug hver især er noget lavere end hovedmotorernes energiforbrug. 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 B2.11 viser emissionen af partikler og NO_x pr. døgn for et udsnit af forpladsområdet i lufthavnen. Det skal understreges at emissionsskalaen 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). Emissionssporet 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.

Figureerne B2.12, B2.13 og B2.14 viser særskilt emissionen af partikler og NO_x pr. døgn for hhv. handlingsaktivitet, APU og hovedmotorer for forpladsområdet. Som tilfældet var for Figur B2.11 skal det understreges at emissionsskalaerne på figurene ikke er lineære. På Figurene B2.13 og B2.14 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.



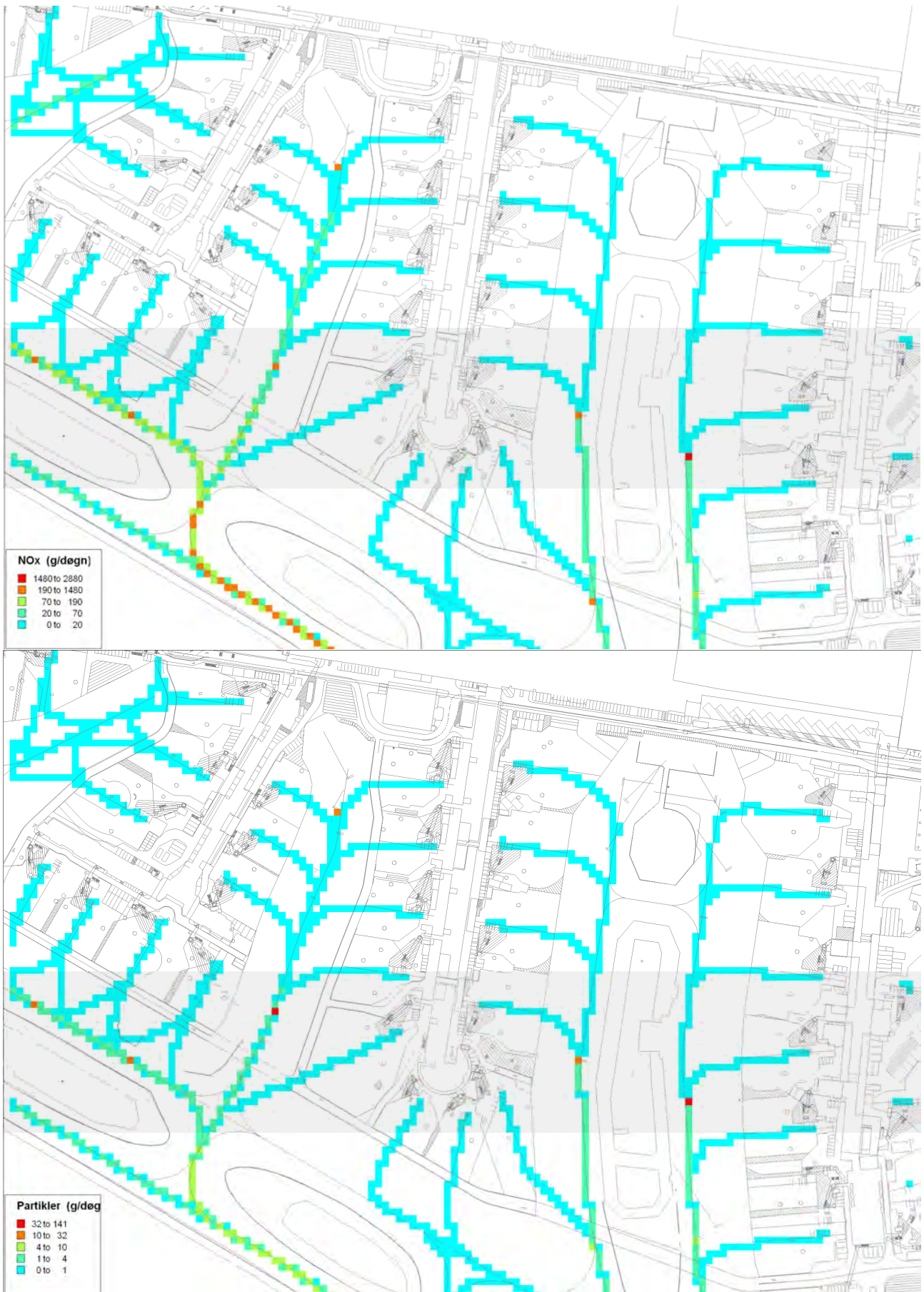
Figur B2.11. Totale emissioner af NO_x og partikler for et døgn i forpladsområdet.



Figur B2.12. Emissioner af NO_x og partikler for handlingsaktivitet i et døgn.



Figur B2.13. Emissioner af NO_x og partikler for APU anvendelse i et døgn.



Figur B2.14. Emissioner af NO_x og partikler for hovedmotorer i et døgn i forpladsområdet.

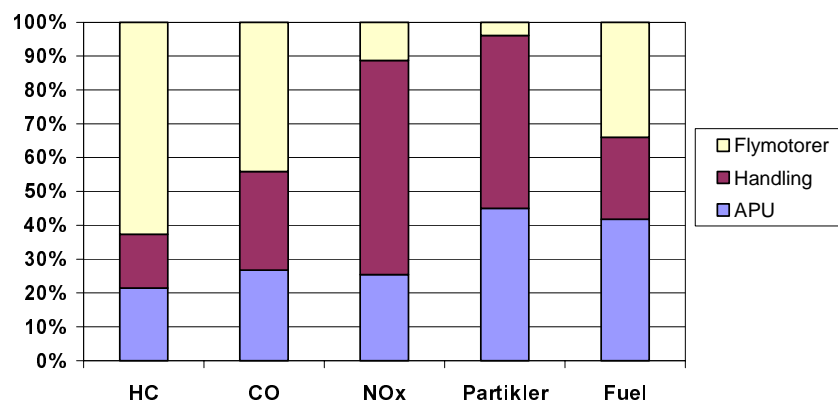
Totale emissioner og brændstofforbrug i et indre forpladsområde



Figur B2.15. Udsnit af forpladsområde kaldet "indre forplads".

På Figur B2.16 vises procentfordelingen af emissioner fra handling, APU og flymotorer fra et mere begrænset område af forpladsen kaldet "indre forplads" (Figur B2.15).

Emissionsandelene fra NO_x og partikler er særligt store for handling og APU. For handling er årsagen de meget store brændstofrelaterede emissionsfaktorer for de dieseldrevne handlingskøretøjer (jf. Tabel B2.8). For APU opvejes de noget mindre brændstofrelaterede emissionsfaktorer af et væsentligt større samlet energiforbrug (jf. Tabel B2.10). 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 B2.8. Omvendt udleder hovedmotorerne som før nævnt store HC og CO emissioner under taxifart og ved motoropstart.



Figur B2.16. Procentfordeling af emissioner fra flymotorer, handling og APU på "indre forplads"

Delkonklusion

Emissionsopgørelsen for lufthavnen indeholder brændstofforbrug og emissioner fra aktiviteter, der udføres med hovedmotorer for fly (drift og motoropstart), hjælpemotorer (APU, Auxiliary Power Unit), handlingsudstyr 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 handlings-selskabernes detaljerede opgørelse af bestanden af handlingsudstyr og tidsrum for grejanvendelse. Ud fra internationale databaser er emissionsfaktorer beregnet for hvert enkelt fly, og for handlingsudstyret 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 er noget 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 forpladsområdet 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.

Emissionsopgørelsen viser, at over 50% af den udledte partikelmasse fra hovedmotorerne stammer fra svovlindholdet i jetfuel, som ifølge oplysninger fra lufthavnens brændstoflager udgør omkring 940 ppm. Forbrændingen af svovl i jetfuel fører til dannelse af sulfatholdige partikler. For APU forventes ligeledes, at en relativt stor andel af den udledte partikelmasse skyldes svovl i jetfuel.

Referencer

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).

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.

ICAO (2007): Airport Air Quality Guidance Manual (doc. 9889), preliminary edition 2007, International Civil Aviation Organization.

ICAO (2008): ICAO COMMITTEE ON AVIATION ENVIRONMENTAL PROTECTION WORKING GROUP 3 - EMISSIONS TECHNICAL, 4th Meeting, 20-24th May 2008, Montreal, Canada, Working Paper: FOA3.0 Guidance Manual for Use By MODTF, CAEP8-WG3-WP08 (FOA3.0 Guidance Manual).

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

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., Gyldenkerne, 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>.)

Tabel B2.12 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
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

Tabel B2.12 – fortsat

Flytype	Flygruppe	Flytype APU	Antal motorer	Motortype	Fly			Dim. kilde
					Længde	Højde	Bredde	
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	B	BJ/RJ	2	MTF	20	6	20	Estimated
INTL AEROSPACE C	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

Table B2.13. Standpladsoplysninger for Københavns Lufthavn.

Standplads	Pushback (Y/N)	Hovedmotor tændt (Y/N)	Tankning	Standplads	Pushback (Y/N)	Hovedmotor tændt (Y/N)	Tankning
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
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 B2.14. 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 B2.15. Emissionsfaktorer og brændstofforbrug for APU motorer.

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	0,024	171,449
>300 new	12	Normal running	2,892	0,989	0,149	0,078	0,026	237,782
>300 new	5	Normal running	2,892	0,989	0,149	0,078	0,026	237,782
>300 new	18	Normal running	2,892	0,989	0,149	0,078	0,026	237,782
>300 new	13	High load	4,048	1,384	0,192	0,076	0,027	314,398
>300 old	11	Start-up	1,137	0,389	5,400	0,302	0,064	171,449
>300 old	12	Normal running	2,071	0,708	3,695	0,153	0,071	237,782
>300 old	5	Normal running	2,071	0,708	3,695	0,153	0,071	237,782
>300 old	18	Normal running	2,071	0,708	3,695	0,153	0,071	237,782
>300 old	13	High load	2,645	0,905	2,555	0,125	0,075	314,398
100-200 new	18	Normal running	0,805	0,275	0,419	0,094	0,214	97,623
100-200 new	5	Normal running	0,805	0,275	0,419	0,094	0,214	97,623
100-200 new	11	Start-up	0,364	0,124	3,734	2,662	0,026	71,557
100-200 new	12	Normal running	0,805	0,275	0,419	0,094	0,214	97,623
100-200 new	13	High load	1,016	0,347	0,495	0,091	0,395	123,183
100-200 old	12	Normal running	1,064	0,364	0,336	0,036	0,023	97,623
100-200 old	5	Normal running	1,064	0,364	0,336	0,036	0,023	97,623
100-200 old	11	Start-up	0,565	0,193	1,289	0,105	0,022	71,557
100-200 old	18	Normal running	1,064	0,364	0,336	0,036	0,023	97,623
100-200 old	13	High load	1,354	0,463	0,453	0,036	0,024	123,183
200-300	12	Normal running	1,756	0,601	0,248	0,070	0,069	178,944
200-300	11	Start-up	0,798	0,273	0,982	0,243	0,061	103,982
200-300	13	High load	2,091	0,715	0,239	0,059	0,072	198,950
200-300	18	Normal running	1,756	0,601	0,248	0,070	0,069	178,944
200-300	5	Normal running	1,756	0,601	0,248	0,070	0,069	178,944
BJ/RJ	5	Normal running	0,452	0,155	0,799	0,044	0,034	91,680
BJ/RJ	11	Start-up	0,274	0,094	1,019	0,107	0,017	51,926
BJ/RJ	12	Normal running	0,452	0,155	0,799	0,044	0,034	91,680
BJ/RJ	13	High load	0,53	0,181	0,805	0,042	0,046	107,127
BJ/RJ	18	Normal running	0,452	0,155	0,799	0,044	0,034	91,680
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

Tabel B2.16. Emissionsfaktorer og brændstofforbrug for handlingskøretøjer.

Fuel type	Direktiv	St. kode	Effektint.	Emissionstrin	Årsint.	NO _x	NO ₂	VOC	CO	TSP	Fuel	Fuel	
					Startår	Slutår	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	g/kWh	MJ/kWh	
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

Tabel B2.16 fortsat

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

Bilag 3: Modelberegninger for baggrunden

Til brug for de detaljerede meteorologiske spredningsberegninger til bestemmelse af de forskellige kilders bidrag til luftkoncentrationerne af NO_x , NO_2 og $\text{PM}_{2,5}$ på forpladsen, er det nødvendigt også at kende bidraget fra kilder uden for forpladsen. Bidraget til forpladsen er beregnet ved brug af tre spredningsmodeller på forskellig rumlig skala, hvor modellen med størst rumlig opløsning zoomer ind på forpladsen. Modellen på den største skala, DEHM, beregner et koncentrationsbidrag til modellen på den største skala, DEHM, beregner et koncentrationsbidrag til modellen på mellemskala, OML, der igen beregner et samlet bidrag til den detaljerede model for forpladsen, MISKAM. De enkelte modeller anvender kun emissioner fra områder, der ikke allerede er indeholdt i en mindre model. Emissionsbidragene fra de forskellige typer af kilder holdes adskilt i modellerne, således at kildernes bidrag til de beregnede og målte koncentrationer kan estimeres. Her beskrives beregninger med de to geografisk største modeller DEHM og OML.

Metode

Spredningsberegningerne og emissionsopgørelserne er opdelt i to områder: Et område på $10 \times 10 \text{ km}^2$ som dækker hele Kastrup Lufthavn, det meste af Amager og dele af København, samt området udenfor dette. I det afgrænsede område (OML-domænet) anvendes lokalskala spredningsmodellen OML med emissioner i en relativ fin opløsning på $50 \times 50 \text{ m}^2$, $250 \times 250 \text{ m}^2$ og $1 \times 1 \text{ km}^2$. Uden for området anvendes regionalskala-modellen DEHM med en grovere opløsning af emissioner på $1 \times 1 \text{ km}^2$ i Danmark og $50 \times 50 \text{ km}^2$ i udlandet.

DEHM beregner et baggrundsbidrag for kilder uden for OML-domænet i form af en tidsserie af timelige middelkoncentrationer i grænselaget på kanten af domænet uden inddragelse af emissioner fra domænet. Grænselaget er et turbulent luftlag ved jordoverfladen på 100-1000 m tykkelse, hvor overfladeemissioner opblandes. OML beregner herefter bidraget fra kilder i domænet og inddrager DEHM's baggrundsbidrag.

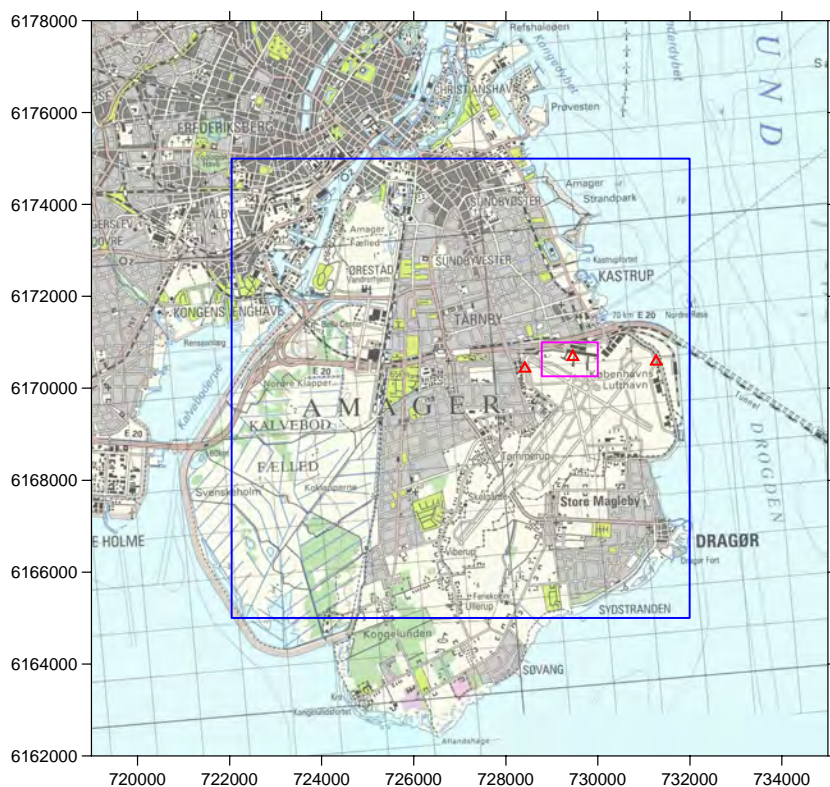
Til brug for de detaljerede CFD-beregninger med MISKAM modellen for forpladsen (Kapitel 7) beregner OML en tidsserie af NO_x , NO_2 og $\text{PM}_{2,5}$ koncentrationer til et udsnit af forpladsen på $750 \times 1250 \text{ m}^2$ dog uden at inddrage emissionen fra dette område. Figur B3.1 viser de forskellige model-domæner.

I dette kapitel præsenteres resultater og analyser af OML-beregninger i form af geografisk fordeling og sammenligninger med målinger. Disse beregninger inddrager alle emissioner inklusive dem fra det nævnte udsnit af forpladsen.

Spredningsmodeller

DEHM (Danish Eulerian Hemispheric model; Christensen 1997, Frohn et al 2003) er en hemisfærisk langtransportmodel med varierende geografisk opløsning, som er størst over Danmark, hvor beregningspunkterne

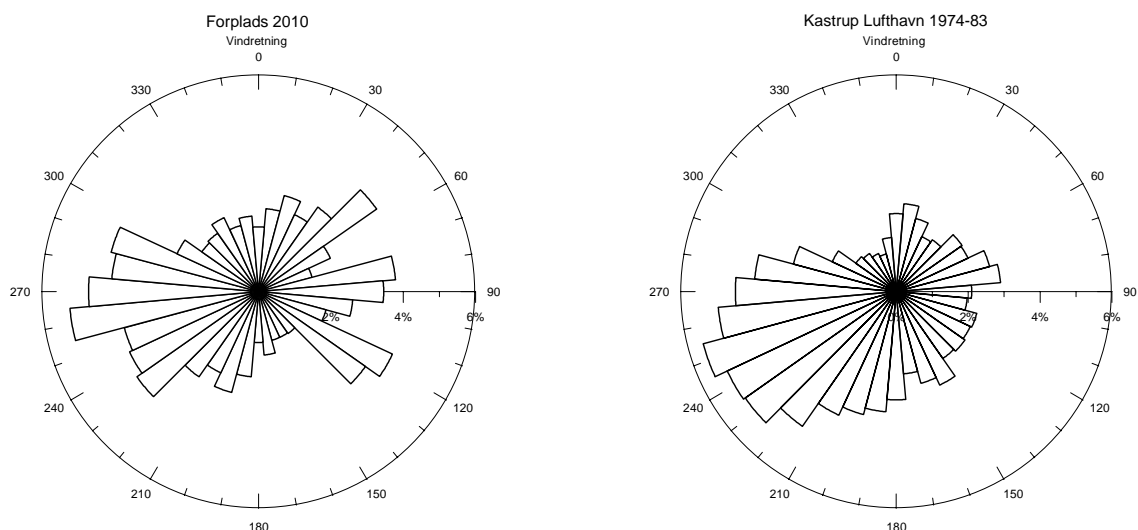
hver repræsenterer gennemsnitsværdier for arealer af 5,5x5,5 km². Modellen inddrager således emissioner og atmosfærisk spredning for kilder i Europa og faktisk hele den nordlige halvkugle. Udover NO_x, NO₂ og PM_{2,5} inddrager modellen en lang række andre stoffer, som indgår i kemiske transformationer og partikeldannelse på lang tidsskala. DEHM anvender danske og internationale emissionsopgørelser, som over Danmark er med en opløsning på 1x1 km².



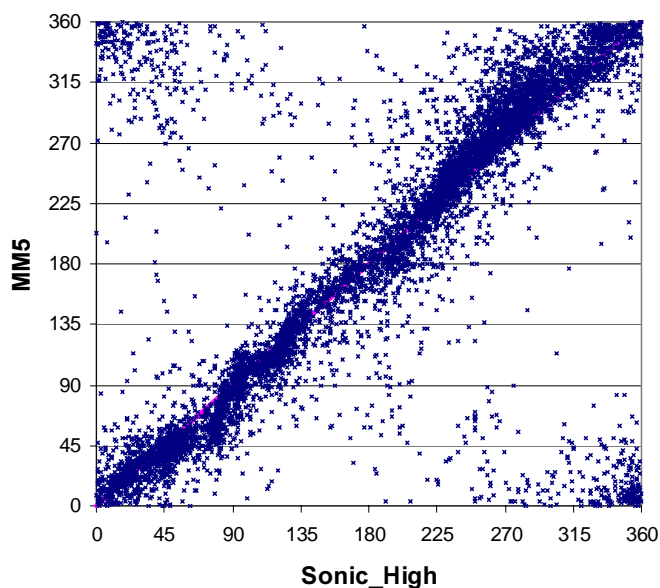
Figur B3.1. Kort med de anvendte modellers beregningsdomæner. Blå ramme viser OML-domænet på 10 x 10 km²; udenfor anvendes DEHM. Cyan ramme viser dele af forpladsen (750mx1250m) anvendt til detaljerede beregninger med MISKAM. Målestationerne Vest, B4 og Øst er vist med røde trekanter.

De meteorologiske data til at drive DEHM kommer fra den amerikanske udviklede meteorologiske model MM5 (*Grell et al. 1995*), som kører operationelt i DCE.

OML (Operationel Meteorologisk Luftkvalitetsmodel; Olesen et al., 2007) er en Gaussisk røgfanemodel, som anvendes i Danmark i forbindelse med miljøgodkendelser af luftforurenende virksomheder og udgør en del af luft- og lugtvejledningen fra Miljøstyrelsen. Modellen håndterer punkt og arealkilder, dog repræsenteres alle kilder, som her indgår i beregningerne, som arealkilder med varierende størrelse og udslipshøjde. Modellen beregner timemiddelværdier af koncentrationen gennem fx et helt år, her 2010, på grundlag af en tilsvarende meteorologisk tidsserie. De meteorologiske data anvendt her er fra MM5, dog erstattet med de observerede vindretninger målt i masten på forpladsen, når de findes eller målte vindretninger i København på H.C. Ørsted Institutet. Vindrose for de anvendte vindretninger for 2010 er vist i Figur B3.2 sammen med en klimatisk vindrose.



Figur B3.2. Vindrose for vindretninger på forpladsen anvendt i spredningsberegner for 2010 (venstre). Retningerne er hovedsageligt fra meteorologi masten på forpladsen, hvor nogle manglende målinger er erstattet med data fra den meteorologiske model MM5, som rimeligt præcist kan beregne retningen, se Figur B3.3. Til sammenligning er også vist vindrosen for 1974-84 for DMI-mast (højre), der er placeret midt mellem bane 22R og L.



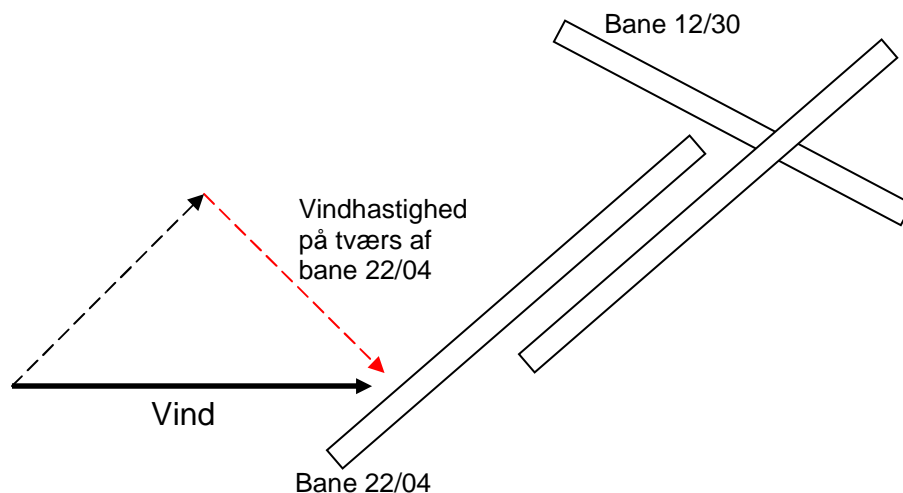
Figur B3.3. Vindretninger målt i masten på forpladsen, Sonic_High, i 18 m sammenlignet med vindretninger fra den meteorologiske model MM5.

Emissioner fra lufthavnen

Ved modelberegningerne med OML anvendes emissioner for lufthavnen, der er opgjort for 4 typiske dage, hvor emissionen hovedsageligt er knyttet til anvendelse af enten bane 22 L+R, 04 L+R, 12 eller 30 (Kapitel 4). For hver dag er emissionen opgjort for hver time i 50x50 m² felter. Det er de meteorologiske forhold, der bestemmer hvilken bane der anvendes. Når vindhastigheden på tværs af bane 22/04 er under 8 m/s anvendes enten bane 22 eller bane 04 afhængig af vindretningen (Figur B3.4). Ved større vindhastigheder på tværs anvendes bane 12 eller 30.

Ved spredningsberegningerne med OML afgør den aktuelle times vindhastighed og vindretning, hvilken af de 4 emissionsdage der anvendes. Med den benyttede meteorologi for 2010 er banerne 22, 04, 30 og 12 anvendt i henholdsvis 54 %, 44 %, 1,3 % og 0,3 % af timerne.

Den detaljerede emissionsopgørelse for lufthavnen er, som nævnt, opdelt på kilderne: flymotorer, APU, handling og øvrig kørende trafik.



Figur B3.4. Skitse af startbaner med eksempel på hvordan en vindretning og vindhastighed kan opløses i en vindkomponent på tværs af bane 22/04. Størrelsen af tværkomponenten er bestemmende for valg af bane for start og landing og dermed hvilken emissionssituation, som anvendes i modelberegningerne.

Emissioner uden for lufthavnen

Ud over den detaljerede emissionsopgørelse for lufthavnen, indgår følgende opgørelser i spredningsberegningerne.

I og uden for OML-domænet (10 km x 10 km) anvendes emissionsopgørelser, som opgøres nationalt og internationalt og rapporteres til en alment tilgængelig international database. Emissionerne er fordelt på forskellige SNAP-kategorier (Selected Nomenclature for Air Pollution; ETC/AEM – CITEPA, 1996). Databasen indeholder en opdeling, som bl.a. identificerer:

- Kraftværker
- Virksomheder
- Boligopvarmning
- Vejtrafik
- Andre mobile kilder end vejtrafik (fx fly, tog, skibe, militær etc.)
- Affaldsforbrænding

Den tidslige variation af emissionen er beskrevet for hver type. De danske emissioner er opgjort på 1 km x 1 km (Plejdrup og Gyldenkerne., 2011) og de udenlandske på 50 km x 50 km.

Udenfor OML-domænet er alle typer emissioner anvendt i DEHM-beregningerne. Inden for domænet er alle typer undtagen vejtrafik og lufthavnsemissioner anvendt med en 1x1 km² opløsning.

Vejtrafikken, som er en relativt stor kilde, er håndteret via et udtræk fra DCE's vejdatabase med geografisk opløsning på 250 m x 250 m, som har oplysninger om fordelingen af køretøjskategorier og trafikmønstre. Dog er emissionen fra motorvejen lige nord for lufthavnen opgjort på 50 m x 50 m, hvilket giver mere præcise beregninger for forpladsen, som befinder sig i en relativ kort afstand fra motorvejen..

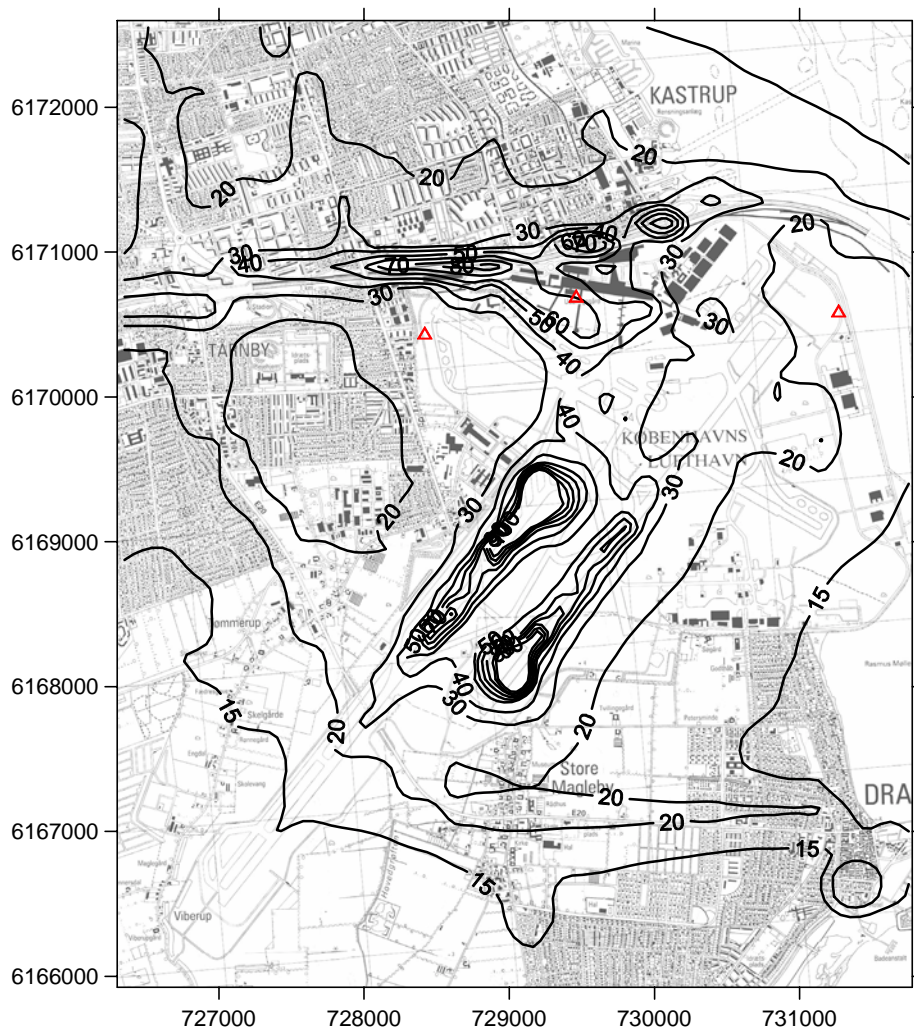
Overordnet fordeling af koncentrationer i lufthavnen og nærområdet

I det følgende præsenteres resultatet af spredningsberegninger med OML for situationen, hvor emissioner fra alle kilder indgår - incl. emissioner fra det centrale område på forpladsen. Resultaterne vedrører årsmiddelværdier af koncentrationen af NO_x, NO₂ og PM_{2,5} for år 2010. Den geografiske fordeling af koncentrationerne er vist for lufthavnen og nærområdet (ca. 5,4 km x 6,6 km) beregnet i et gitternet med afstand på 150 m mellem receptorpunkterne.

Figur B3.5 viser årsmiddelværdien af NO_x. På grund af det grove receptornet og de grove emissionsfelter skal man ikke se for meget på detaljerne i kurveforløbene. Forhøjede koncentrationer ses på forpladsen; dog er de præcise niveauer bestemt med MISKAM-beregninger i Kapitel 6. Der ses meget høje niveauer på bane 22/04, hvor flyene påbegynder take-off og holder i kø under vestlige og østlige vindretninger. Koncentrationerne er her en hel del højere end de viste, idet største viste isokurver er på 100 µg/m³.

Der ses et langstrakt lokalt område med relativt høje koncentrationer langs motorvejen lige nord for lufthavnen. Isokurverne 'hopper' lidt langs motorvejen på grund af det grove receptornet, hvor receptorpunkterne nogle steder er placeret midt på vejen og andre steder ligger noget fra vejen. Samme lidt svagere koncentrationsforløb ses langs Englandsvej mod Dragør vest og syd for lufthavnen.

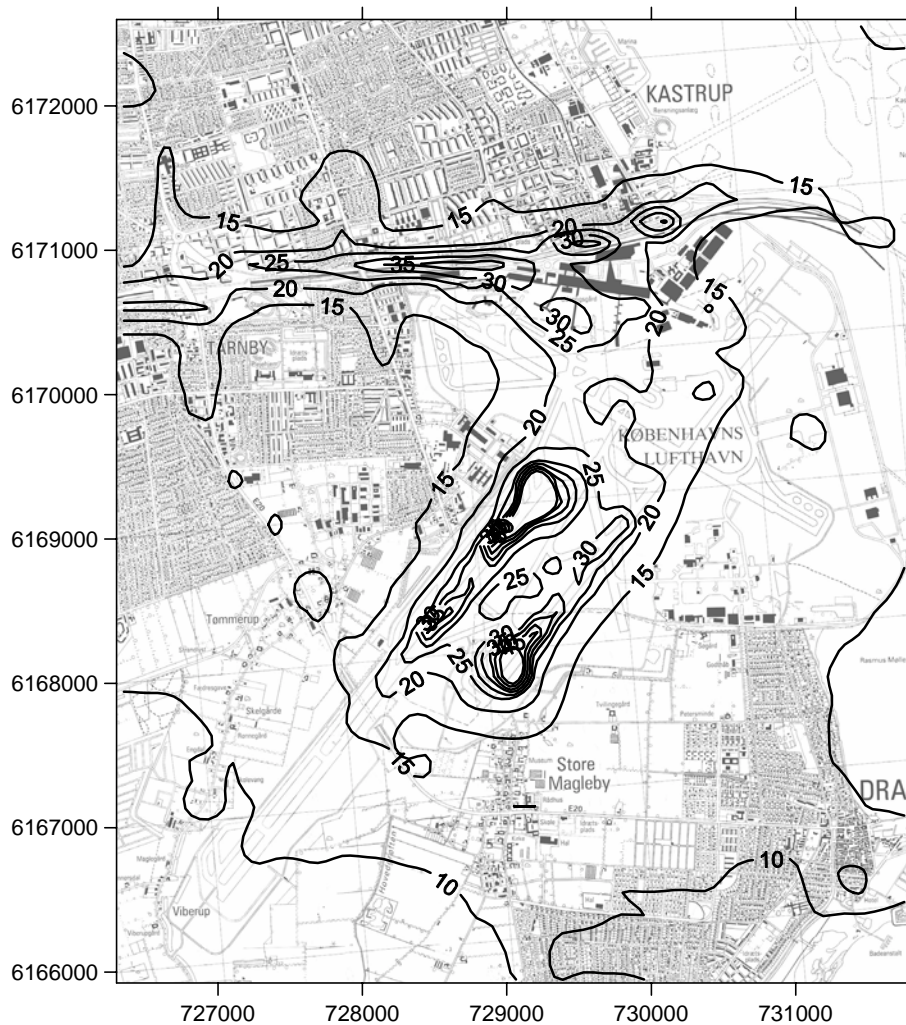
Koncentrationerne i den nordligste kant af kortet er generelt højere end i den sydligste kant, hvilket skyldes emissionerne fra København.



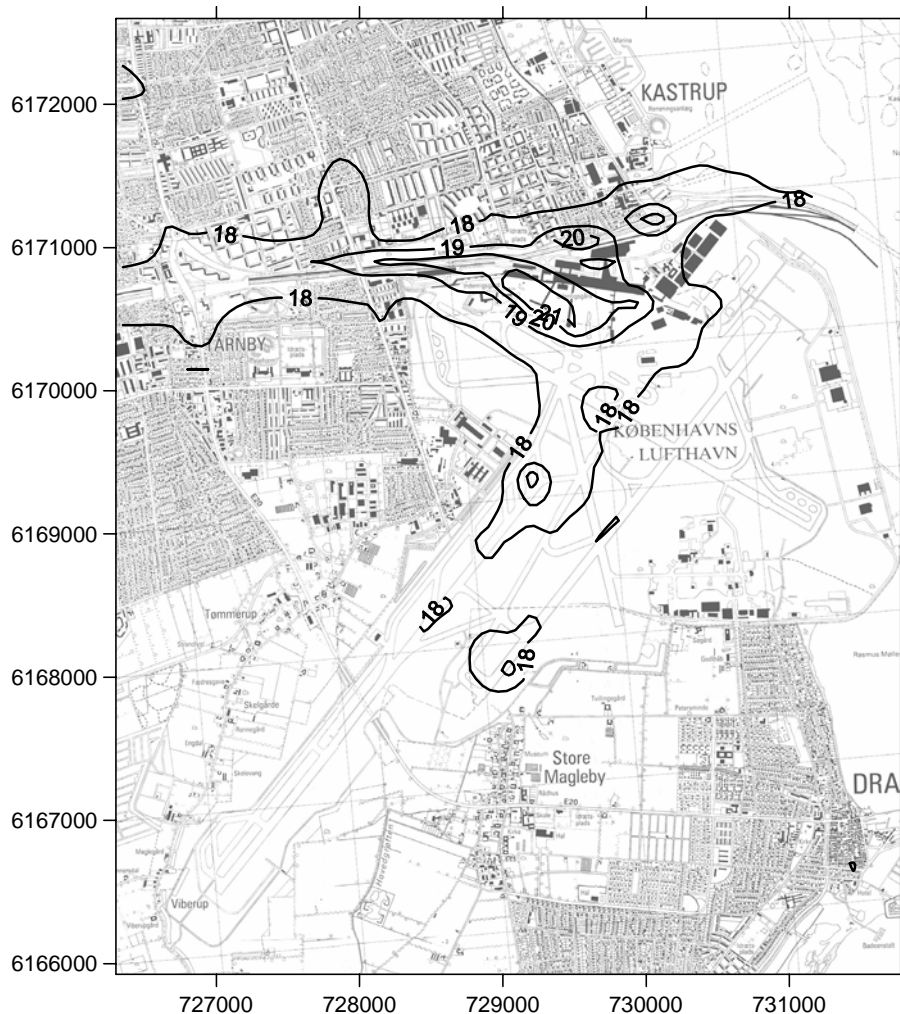
Figur B3.5. Overordnet geografisk fordeling af årsmiddelværdien af NO_x (mikrogram/ m^3). Spredningsberegninger med OML i gitternet på 150 m. Isokurver for 15, 20, 30, ..., 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. De røde trekanter viser positioner for målestationerne Vest, B4 og Øst.

I Figur B3.6 er vist årsmiddelværdier for NO_2 . Mønsteret i den geografiske fordeling er det samme som for NO_x . Det ses igen, at motorvejen har mest påvirkning på forpladsens vestlige del.

Årsmiddelværdier for $\text{PM}_{2,5}$ er vist i Figur B3.7. Igen er det overordnede mønster det samme som for NO_x , dog har forpladsen relativt højere koncentrationer og området med take-off/kø har relativt lavere koncentrationer. De beregnede koncentrationer er adderet en manglende masse på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ i baggrundsbidraget fra DEHM. Den manglende masse er velkendt og skyldes, at langtransportmodeller endnu ikke er i stand til at modellere de organiske sekundære partikeldannelser. Størrelsen af den manglende masse varierer en del gennem året, men er i gennemsnit på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$.



Figur B3.6. Overordnet geografisk fordeling af årsmiddelværdien af NO₂ (µg/m³). Spredningsberegninger med OML i gitternet på 150 m. Isokurver er vist for 10, 15, 20, ..., 50 µg/m³.

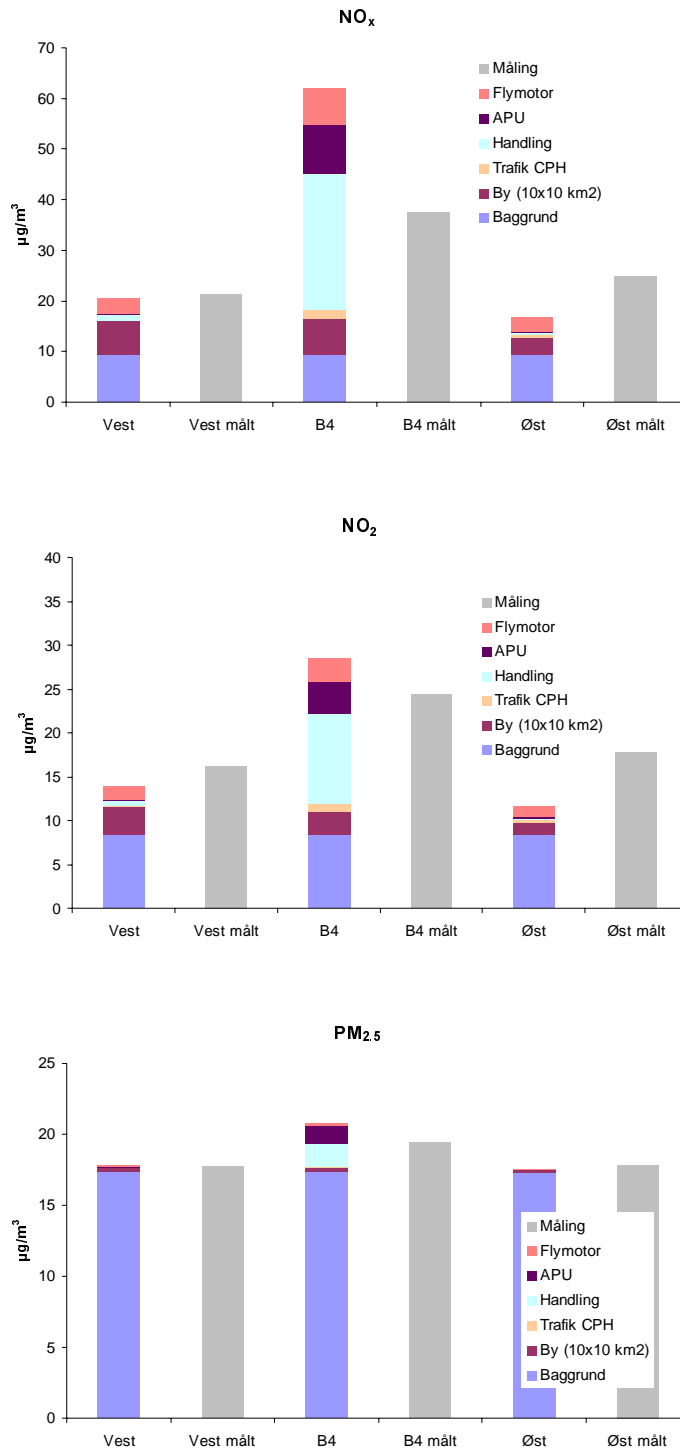


Figur B3.7. Overordnet geografisk fordeling af årsmiddelværdien af $PM_{2,5}$ ($\mu g/m^3$). Spredningsberegninger med OML i gitternet på 150 m. Isokurver for hvert $\mu g/m^3$.

Den geografiske fordeling af koncentrationer for hele lufthavnen viser, at forpladsen er det sted i lufthavnen, hvor personel er mest udsat for forhøjede niveauer af NO_x , NO_2 og $PM_{2,5}$.

Resultater for målestationer Vest, B4 og Øst

I OML-beregningerne er det muligt at 'tænde' og 'slukke' for de forskellige typer af kilder. Dette er gjort i en række beregninger, således at forskellige kildetyper bidrag til de beregnede koncentrationer kan identificeres. I Figur B3.8 er vist en sammenligning af de målte og beregnede koncentrationer af NO_x , NO_2 og $PM_{2,5}$ for målestationerne Vest, B4 og Øst. De beregnede koncentrationer er opdelt på kilderne: *Baggrund* (DEHM bidrag), *By* (bidrag fra OML-domænet 10×10 km²), *Trafik CPH* (trafik i lufthavnen), *Handling*, *APU* og *flymotor*.



Figur B3.8. Sammenligning af målt og beregnede årsmiddelværdier ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) af NO_x , NO_2 og $\text{PM}_{2.5}$. For beregningerne er de forskellige kildertypers bidrag angivet. For $\text{PM}_{2.5}$ er adderet et regionalt baggrundsbidrag på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (se tekst).

Opsplitningen på kildetyper er kun præcis for NO_x og $\text{PM}_{2.5}$, idet det for NO_2 ikke er muligt, fordi der indgår kemisk omdannelse mellem NO og NO_2 , som ikke indgår ved denne type modelberegninger. Fordelingen af NO_2 mellem kilderne er derfor antaget at have samme relative fordeling som for NO_x dog undtaget baggrund.

Beregningerne med OML for B4 på forpladsen kan ikke tage hensyn til de detaljerede og komplicerede strømninger tæt ved bygningerne. Ligeledes er størrelsen af de anvendte emissionsfelter på forpladsen for store, når målepunktet ligger så tæt på emissionerne. Derfor kan det ikke forventes, at beregningerne kan reproducere målingerne fuldstændigt.

For målestation Vest stemmer målinger og beregninger af NO_x godt overens med respektive 21,3 µg/m³ og 20,6 µg/m³. Her udgør lufthavnens bidrag ca. 25 % af totalen ifølge beregningerne.

For Øst undervurderer OML koncentrationen af NO_x med 32 %; 16,8 mod 24,8 µg/m³. Det kan skyldes, at den anvendte emission fra den indre og ydre 'ringvej' øst for stationen er for lav, at der mangler en ukendt lokal kilde eller at stationen ligger relativt tæt på kanten af OML's beregningsdomæne og at baggrundsbidraget her ikke indeholder en korrekt vertikal profil af koncentrationen.

Som ventet kan OML ikke reproducere koncentrationsniveauet af NO_x ved B4. Her vil eventuelle mindre fejl på bidrag fra handling og APU være dominerende, da kilderne ligger meget tæt på B4. Beregningen ligger 65 % over målingen; 62,0 mod 37,6 µg/m³. Handling udgør en relativ stor andel af den beregnede NO_x koncentration.

Ved B4 er NO₂ beregnet 28,6 µg/m³ mod målt 24,4 µg/m³, hvilket er i relativt bedre overensstemmelse end for NO_x, og skyldes at omdannelsen af NO til NO₂ er begrænset pga. en begrænset mængde ozon i baggrundsluften. For Vest og Øst undervurderes niveauet noget.

For PM_{2,5} er forholdene anderledes. For Vest og Øst måles og beregnes samme niveauer på 17,6-17,8 µg/m³, når der tages hensyn til at der er visse dele af de langtransporterede partikler, som endnu ikke indgår i modelberegningerne. Den manglende andel af partiklerne er estimeret til 10 µg/m³. Samlet udgør baggrundsbidraget ca. 98 % af PM_{2,5}.

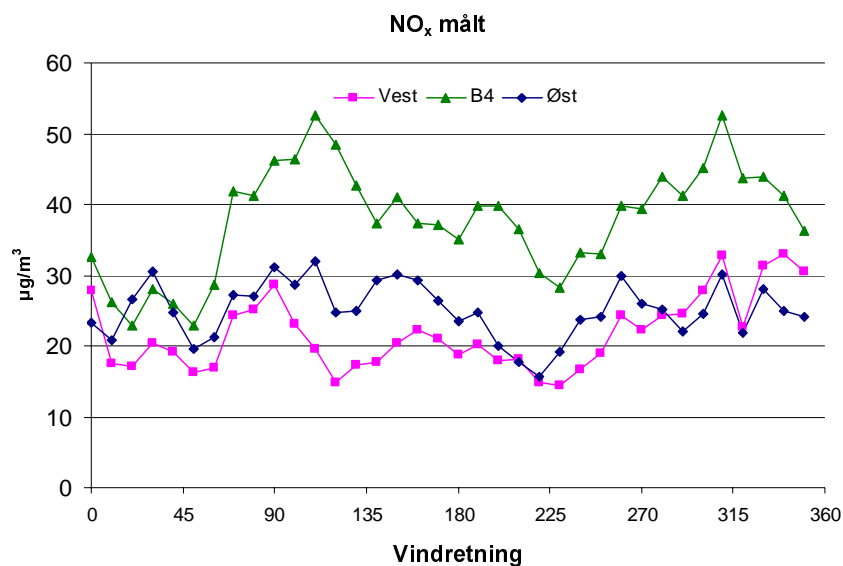
For B4 beregnes igen højere PM_{2,5} end målt; 20,7 mod 19,5 µg/m³. I forhold til Vest ligger B4 16 % højere for beregninger og 9 % højere for målinger, dvs. den beregnede øgning af PM_{2,5} som følge af lufthavnen udgør ca. 75 %.

Der er foretaget supplerende beregninger til belysning af betydningen af eventuelle fejlemissioner i de nærmeste 50 m x 50 m felter omkring B4. 'Slukkes' for emissionen i de 9 nærmeste felter ved B4 fås betydeligt lavere niveauer. Med forbehold for de komplicerede spredningsforhold ved B4 og den begrænsede nøjagtighed af OML under disse forhold, viser dette, at emissionen på forpladsen nær B4 selvfølgelig har stor betydning for beregningen ved B4, og at emissionen, specielt for NO_x, kan være noget overestimeret enten generelt på forpladsen eller en del overestimeret tæt ved B4.

En mulig overestimering af emissionen på forpladsen og til dels for take-off er yderligere begrundet i næste afsnit.

Analyse af koncentrationer og vindretning

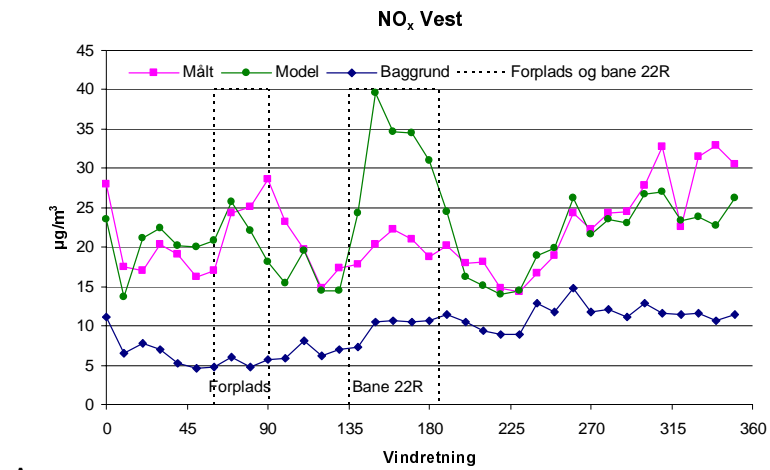
Der er gennemført en detaljeret analyse af målte og beregnede koncentrationer af NO_x i relation til vindretningen med henblik på at finde årsagen til afvigelserne mellem modelberegninger og målinger. I Figur B3.9 er vist målte koncentrationer på station Vest, B4 og Øst for forskellige vindretninger.



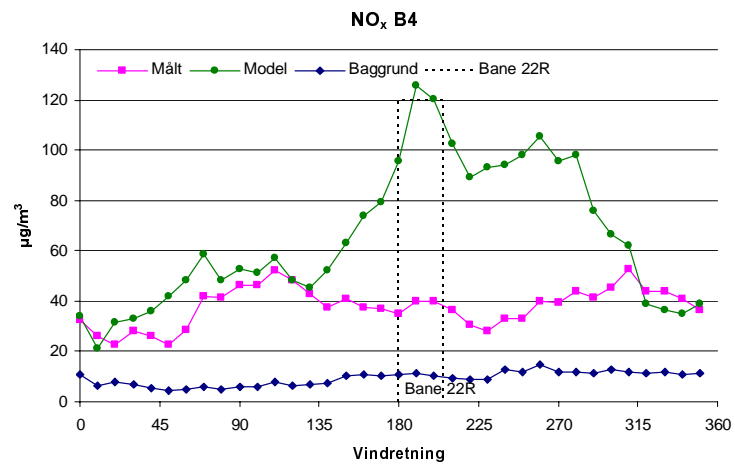
Figur B3.9. Målte NO_x koncentrationer ved stationerne Vest, B4 og Øst for 36 vindsektorer på hver 10 grader.

For de fleste vindretninger måles lavere koncentrationer på Station Vest end på Station Øst, som igen er lavere end Station B4. Det kan umiddelbart undre, at Station Øst er højere end Station Vest for vindretninger med en østlig komponent, idet Vest da er påvirket af lufthavnens emissioner, mens Station Øst ikke er det. Specielt burde Station Vest ligge højere end Øst for sydsydøstlige retninger, idet Vest bliver eksponeret for Take-off-emissioner fra bane 22R (se senere), hvor Station Øst ikke er på samme vis er eksponeret. Tilsvarende kan det ikke umiddelbart forklares at for vindretninger omkring 30 grader har Station Øst højere koncentrationer end Station Vest. En forklaring kan være at der befinder sig nogle ukendte kilder tæt på Station Øst beliggende i østlige retninger.

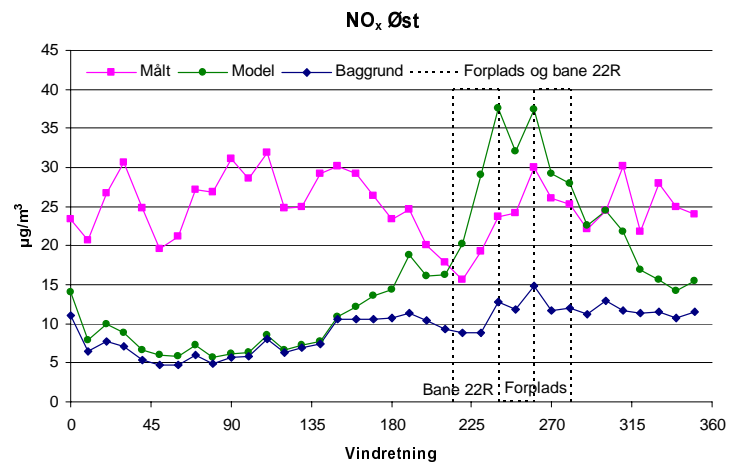
Sammenligning af modelberegninger og målinger for forskellige vindretninger vist i Figur B3.10 giver ikke nogen umiddelbar forklaring på disse forskelle – tvært imod.



A



B



C

Figur B3.10. Sammenligning af målte og beregnede NO_x koncentrationer ved Vest, B4 og Øst for 36 vindsektorer på hver 10 grader. Baggrundsbidraget fra DEHM model, er ens for de tre stationer og er indeholdt i OML-beregninger. A) målinger og beregninger ved station Vest, hvor retning til forplads er 60-90° og til bane 22R er 135-180°, B) station B4, hvor retning til bane 22R er 180-205° og C) station Øst, hvor retning til forplads er 260-280° og til bane 22R 215-240°.

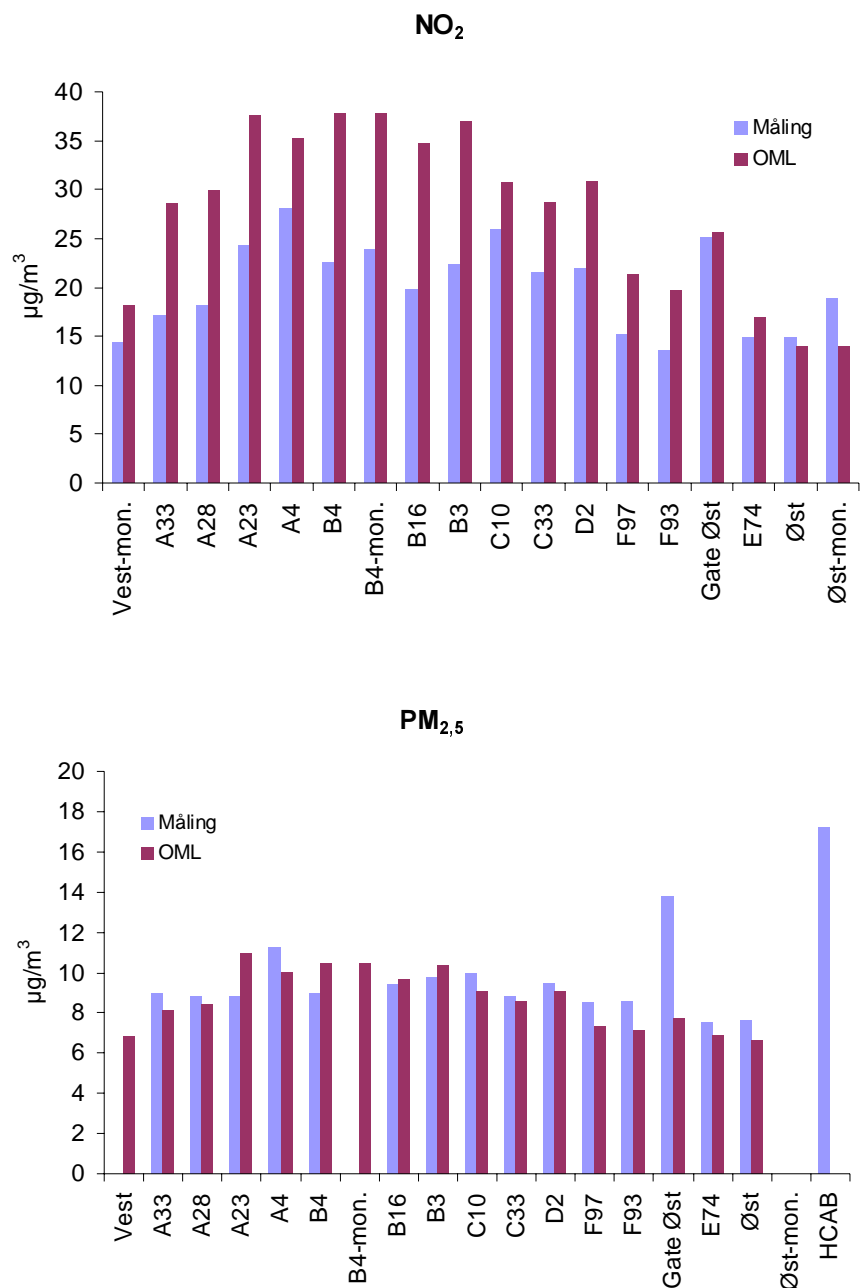
For modelberegningerne ligger Station Øst lavere end Station Vest for vindretninger med en østlig komponent. Denne modsatte forskel i forhold til målingerne kan skyldes, at der er en lokal kilde (emission) ved Station Øst, der ikke indgår i modelberegningerne, og som hæver koncentrationerne helt lokalt, og at emissionen fortyndes meget inden den under østlig vind når frem til Station Vest. Kilden burde ifølge målingerne også påvirke Station Øst under sydlige vindretninger. Kilden er tydeligvis ikke med i emissionsopgørelserne/beregningerne, da den beregnede koncentration for østlig vind ved Station Øst kun er 1/5 af det målte. Emissionen kan muligvis stamme fra lufthavnes interne 'ringvej', som kun ligger ca. 50 m fra stationen og fra den ydre offentlige ringvej lige uden for skellet i 70 m's afstand samt parkeringsanlægget øst for og eventuelt fra rangerterrænet.

Af detaljerne mellem målinger og model for Station Vest og Øst fremgår det, at modellen ligger en del over målingerne, når vindretningen kommer fra take-off-området fra bane 22R (se figurtekst for retningerne). For Vest er niveauet 15-20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for højt og for Øst er det 10-15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for højt. Det kan tyde på at de anvendte NO_x -emissioner fra flymotorer under take-off er for stor eller at røgfanløftet fra jet motorerne, som ikke indgår i modelberegningerne, alligevel har en væsentlig betydning. Station Øst ligger længere væk fra take-off end Vest og derfor er 'fejlen' mindre. Samme overvurdering af modellen ses på Station B4 for Take-off vindretninger 180-200°, men niveauet er overlejet bidraget fra handling. (Bemærk, at målingerne ikke vil være påvirket af Take-off-emissioner fra bane 04R, idet banen kun benyttes ved vindretninger med en nordøstlig vindkomponent.)

På Station B4 overvurderer modellen desuden koncentrationerne i retningerne 135 til 310°, hvilket svarer til retningerne, hvor Station B4 'påvirkes' af den største del af forpladsen. I nordlige retninger er der nogenlunde overensstemmelse med målingerne. Dette antyder at også emissionerne på forpladsen er overestimerede i beregningerne. Denne overestimering har dog relativt mindre indflydelse på de beregnede koncentrationer ved Station Vest og Øst, da stationerne ligger relativt langt væk og her udgør bidraget kun en mindre andel af totalen.

Resultater for horisontal variation på forpladsen

Der er foretaget en sammenligning af målinger og OML-beregninger for målingerne af NO_2 og $\text{PM}_{2,5}$ udført på forpladsen under den 5 uger lange kampagneperiode. Beregningerne med OML på forpladsen kan, som nævnt, ikke tage hensyn til de detaljerede og komplicerede strømninger og den turbulente spredning tæt ved bygningerne. Ligeledes er størrelsen af de anvendte emissionsfelter på forpladsen for store, når beregningspunktet ligger så tæt på betydelige emissioner. Derfor kan det ikke forventes, at OML-beregningerne fuldstændigt kan reproducere kampagnemålingerne af den horisontale variation. Dertil kommer, at det heller ikke kan forventes, at de anvendte statistiske emissioner fra lufthavnen præcist vil svare til de faktisk forekommende emissioner i den korte kampagneperiode. På trods heraf vises i Figur B3.11 en sammenligning.



Figur B3.11. Sammenligning af målt og beregnede middelværdier (µg/m³) af NO_x og PM_{2,5} for kampagneperioden på 5 uger. Til sammenligning er for PM_{2,5} også vist målinger for HCAB. For beregningen af PM_{2,5} er der ikke taget hensyn til et eventuelt manglende regionalt baggrundsbidrag.

NO₂ koncentrationerne beregnet med OML er højere end de målte. PM_{2,5} koncentrationerne er ikke korrigerede for det manglende baggrundsbidrag, da korrektionsstørrelsen ikke kendes for så kort en periode (5 uger). Uden korrektionen ligger målinger og beregninger af PM_{2,5} i gennemsnit på næsten samme niveau.

Den indbyrdes relative variation i de beregnede koncentrationer svarer dog fint til den målte variation. Dette indikerer, at den geografiske placering og den relative variation af emissionen er godt beskrevet, på trods af at emissionerne fra forpladsen formentligt er overestimeret.

Gate Øst afviger fra dette mønster. For Gate Øst er den beregnede værdi for $PM_{2,5}$ relativt lav set i forhold til måleresultaterne. Det skyldes formentligt, at emissionen fra tomgangskørsel for køretøjer i kø ved gaten i disse modelberegninger er fordelt på et område på 50 m x 50 m, hvilket sandsynligvis er for stort, hvorved de beregnede koncentrationer bliver for lave. Hertil kommer at den statistiske emission for tomgang ikke nødvendigvis er korrekt for den korte 5 ugers periode. Endelig har modelberegningerne med OML ikke kunnet tage hensyn til, hvordan selve gate-bygningen påvirker fortyndingen af emissionerne fra køretøjerne ved gaten.

Delkonklusion

Den geografiske fordeling af koncentrationer for hele lufthavnen beregnet med OML viser, at forpladsen er det sted i lufthavnen, hvor personel er mest udsat for forhøjede niveauer af NO_x , NO_2 og $PM_{2,5}$.

De beregnede koncentrationer ved Station Vest stemmer godt overens med de målte niveauer for 2010. Beregnede koncentrationer for Station Øst er undervurderede, hvilket kan skyldes, at der i modelberegningerne mangler en lokal kilde øst for station Øst.

Koncentrationerne på forpladsen er estimeret en del for højt, hvilket sandsynligvis skyldes anvendelse af for høje emissioner fra kilderne på forpladsen.

Den relative geografiske variation af koncentrationen på forpladsen reproduceres godt.

Referencer

Christensen, J.H. 1997: The Danish Eulerian Hemispheric Model – a Three-Dimensional Air Pollution Model Used for the Arctic. – *Atmospheric Environment* 31(24): 4169-4191.

ETC/AEM – CITEPA, 1996: Selected nomenclature for air pollution for CORINAIR 94 inventory (SNAP 94). EEA, 14/06/96. Available at: <http://www.eea.europa.eu/publications/92-9167-033-2/TopRep12-96-Annex-1a.pdf>.

Frohn, L., Christensen, J., Brandt, J., Geels, C. & Hansen, K. M. 2003: Validation of a 3-D hemispheric nested air pollution model. – *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions* 3, 3543 – 3588.

Grell, G. A., Dudhia, J. and Stauffer, D. R., 1995: A description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Centre for Atmospheric

Research, Boulder, Colorado, NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR, pp. 114.

Olesen, H.R., Berkowicz, R. & Løfstrøm, P. (2007): OML: Review of model formulation. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. - NERI Technical Report 609: 130 pp. (electronic). Available at: <http://www.dmu.dk/Pub/FR609.pdf> .

Plejdrup, M.S. & Gyldenkerne, S. 2011: Spatial distribution of emissions to air – the SPREAD model. National Environmental Research Institute, Aarhus University, Denmark. 72 pp. – NERI Technical Report no. FR823. <http://www.dmu.dk/Pub/FR823.pdf>

Bilag 4: Modelberegninger for forpladsen

Metode

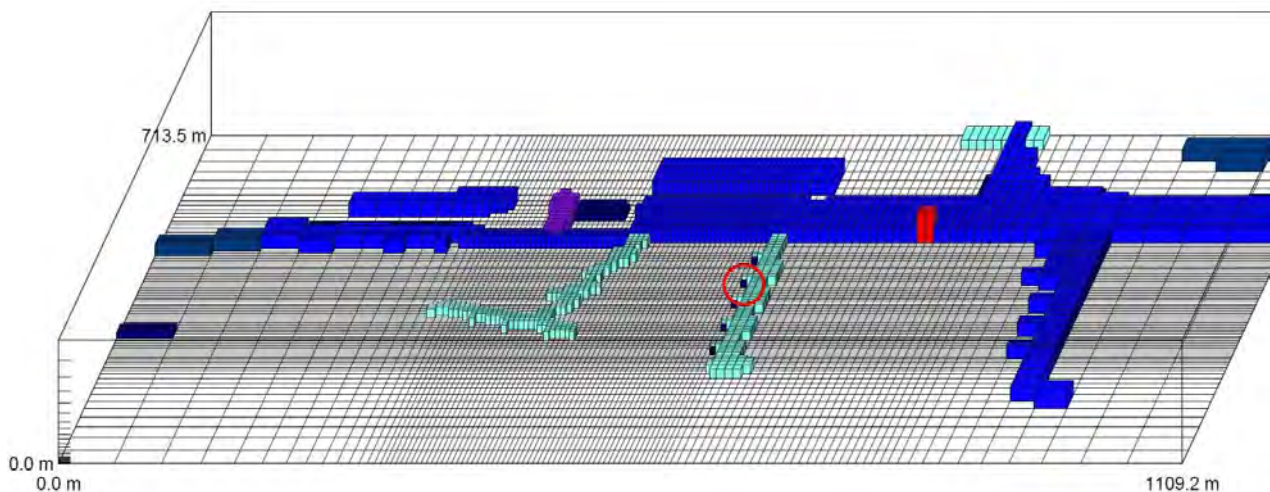
Lufthavnsbygningernes udformning påvirker de lokale meteorologiske forhold og dermed spredningen af luftforureningen på forpladsen. Derfor er der blevet anvendt en såkaldt CFD-model (Computational Fluid Dynamics), som er udviklet til at tage hensyn til de detaljerede komplekse luftstrømninger omkring bygninger.

Ved modelberegningerne har vi benyttet den seneste version (6.1) af den tyske CFD-model MISKAM (Eichhorn, 1996, Lohmeyer, 2011) som tidligere også blev anvendt af DCE (Olesen et al. 2009). Man er underlagt en række modelmæssige begrænsninger, som man til dels kan imødegå ved passende tilrettelæggelse af modellens opsætning og input (f.eks. er beregningsgitterets tæthed af væsentlig betydning og gitteret skal være rektangulært). Andre begrænsninger på modellen er, at man antager neutral stabilitet i atmosfæren og at man ikke kan simulere at udstødning fra flymaskiner er varm. Mht. røgfanløft vil modelberegningerne tage hensyn til disse forhold gennem den initiale spredning.

Figur B4.1 viser beregningsgitteret som er blevet brugt i dette projekt. Beregningsgitteret har en opløsning i centrum på 5 m x 5 m og gittercellerne bliver større ud mod randen af modelområdet. Hele modelområdet er på ca. 1000 m x 700 m x 500 m og er drejet med 10 grader i forhold til nord-retning for at gitteret kommer til at ligge parallelt med hovedbygningen. Dette giver det bedste digitaliseringsresultat i MISKAM. Hele gitteret omfatter ca. 275.000 gitterceller. Bygningspolygoner samt højde af bygninger blev leveret af Københavns Lufthavne A/S og blev projiceret over på gitteret i MISKAM.

Emissionerne blev opdelt i fire kildegrupper (flymotorer, APU, handling og vejtrafik på forpladsen). Placering af og tidsvariation for emissionerne er baseret på den tidligere beskrevne emissionsopgørelse (Kapitel 4). Der er taget hensyn til, at aktivitetsniveau i emissionsopgørelserne var ca. 13% over årsgennemsnit. Dvs. at emissioner fra flymotorer, APU og handling blev multipliceret med en faktor 0,87.

Baggrundskoncentrationer som kommer fra kilder udenfor MISKAM's beregningsområde er blevet beregnet med OML i en modelkørsel, hvor man har slukket for alle kilder i et område svarende til MISKAM's gitter. Dette er for at undgå at medtage kilderne to gange.

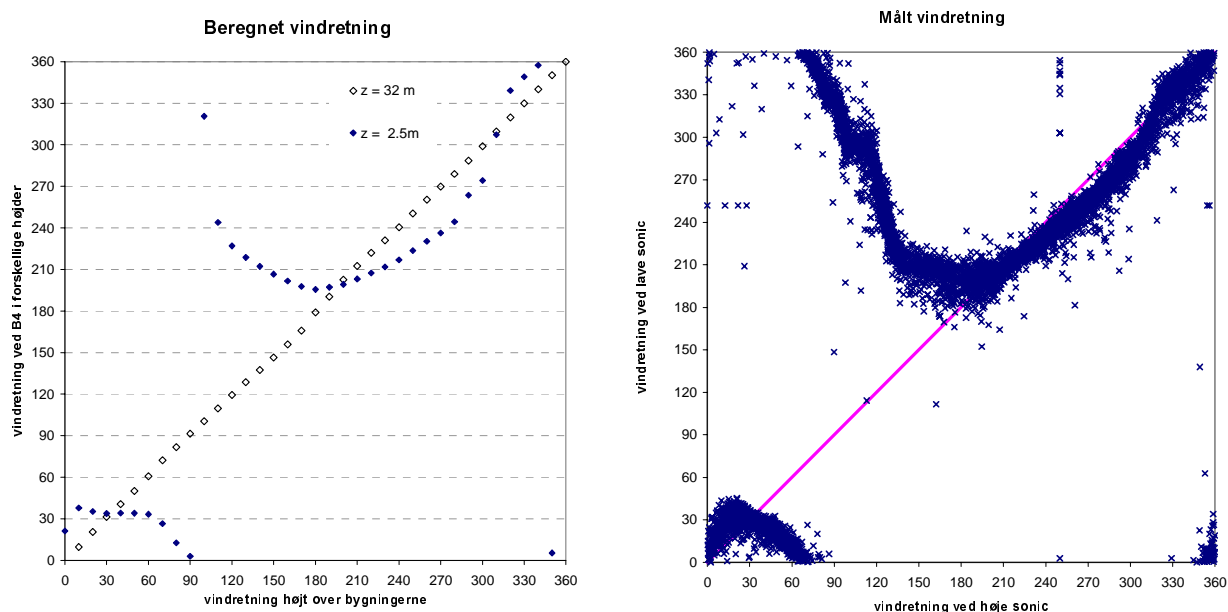


Figur B4.1 Beregningsgitter i MISKAM-modellen i en skrå 3D visualisering. Farver indikerer forskellige højde af bygninger i modellen. Den røde ring indikerer placering af Station B4.

MISKAM-modellen beregner i første omgang strømningsforhold på forpladsen for 36 forskellige vindretninger (0, 10, 20, ... 350). For at sikre, at modellen er i stand til at tage højde for bygningernes påvirkning af vindens strømningsforhold (vindretning og vindhastighed) ved Station B4 blev vindmålingerne fortaget med Sonic-vindmåler og derefter sammenholdt med resultaterne fra modellen. Der blev målt vind i to højder ved B4:

- En høj måling i omkring 12 meters højde, hvilket er højere end de nærliggende bygninger. Denne måling kan betragtes uden for påvirkning af bygningseffekter samt
- En lav måling i omkring 3 meters højde direkte ved målestationen. Denne måling af vindretning er påvirket af de nærliggende bygninger.

Resultaterne fra de målte vindretninger (højre graf i Figur B4.2) viser tydeligt, at vindretninger på den høje og lave måleposition er ens for vindretninger med vestlige komponenter, hvor vindretningen ikke påvirkes af bygningerne (ca. vindretning 180-360-30). Når vindretningerne kommer fra Finger-B-bygningen (retning 30 til 180) observeres en drejning af vindretningen ved den lave måleposition i forhold til vindretningen ved den høje måleposition. Dette skyldes bygningernes påvirkning på vinden. MISKAM (venstre graf i Figur B4.2) reproducerer meget tilfredsstillende denne effekt af bygningen på vindretningen ved den lave måleposition.



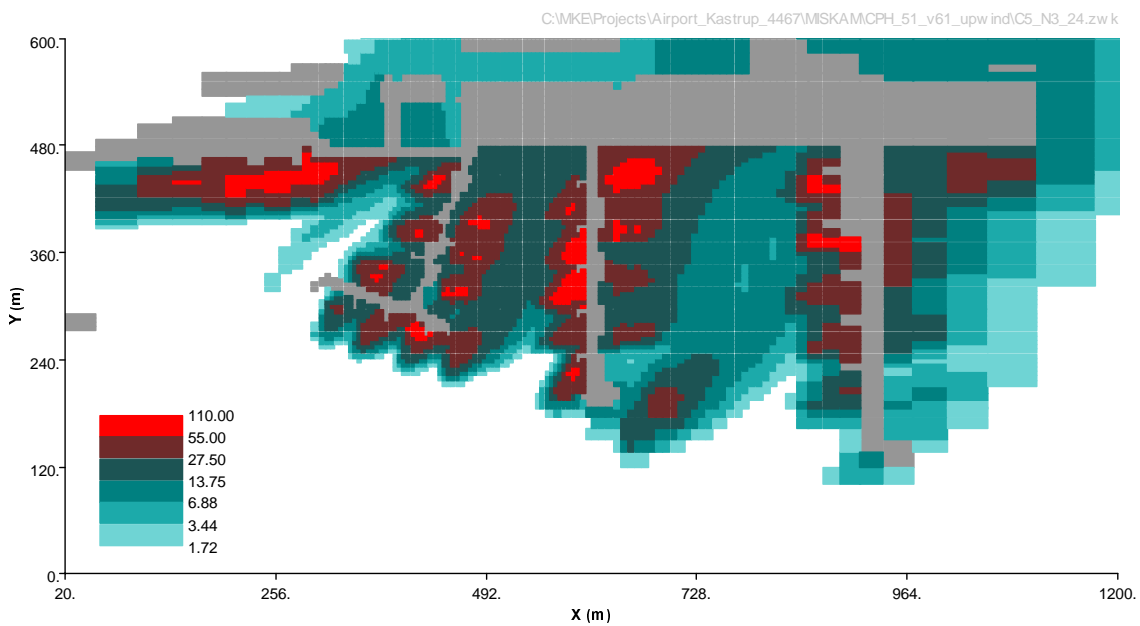
Figur B4.2. Vindretninger i grader ved Station B4 beregnet med MISKAM (venstre graf) og målt med sonic (højre graf). Målinger repræsenterer timemiddelværdier for 2010.

Som næste trin blev der foretaget spredningsberegninger for NO_x og $\text{PM}_{2,5}$ separat for hver kildegruppe og vindretning. Det svarer til i alt 288 ($2 \times 36 \times 4$) modelkørsler.

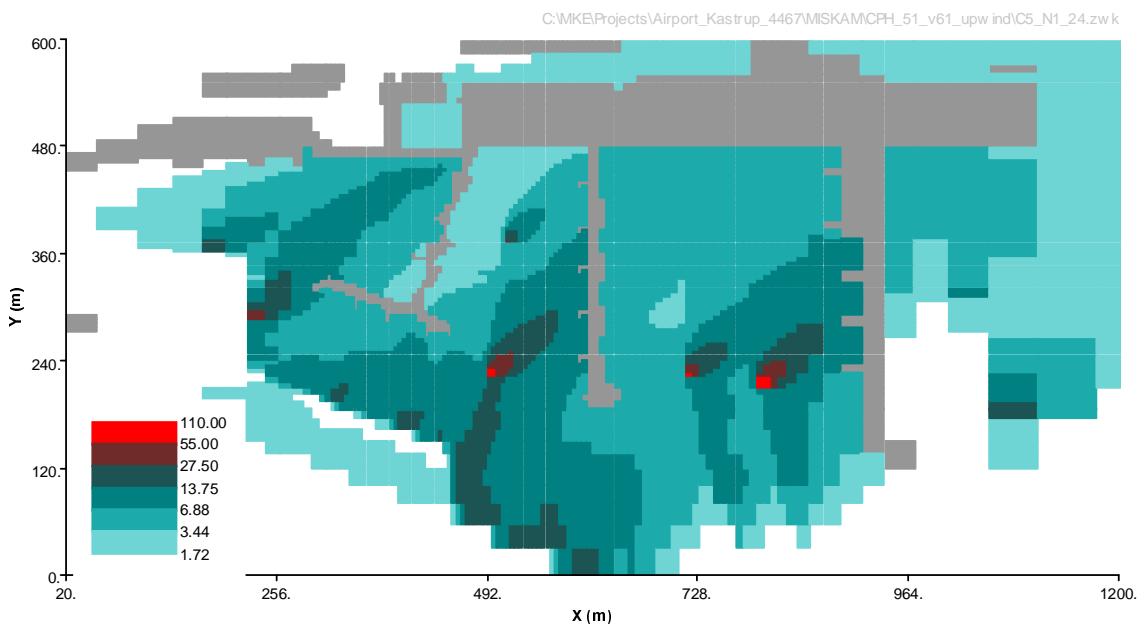
Koncentrationsresultater blev til sidst brugt til at generere en tidsserie af koncentrationerne af NO_x og $\text{PM}_{2,5}$ på udvalgte punkter (f.eks. B4). Her indgår døgnvariation af emissioner baseret på emissionsopgørelsen, de aktuelle vindretninger og vindhastighed (samme antagelser som i OML-beregningerne) samt baggrundskoncentrationer med bidrag fra kilder udenfor MISKAM's område beregnet med OML.

Variation af koncentrationer med vindretning

Resultater fra CFD-modellen, viser hvordan emissioner fra forskellige steder på forpladsen vil sprede sig under hensyn til de komplekse vindstrømninger skabt af bygninger i lufthavnen. Modellen giver dermed en god beskrivelse af forureningsniveauerne på forpladsen. Som eksempel viser Figur B4.3 NO_x -koncentrationer på forpladsen når kun emissionerne fra handling er taget i betragtning. Det er tydeligt, at koncentrationer er forøget lokalt i de områder, hvor kilderne ligger og hurtigt aftager med afstanden. Til sammenligning viser Figur B4.4 koncentrationer for emissioner kun fra flymotorer. Emissionerne er størst ved opstartsmærkerne og på taxiruterne, dvs. i større afstand til terminalbygningerne. Derfor kan emissionerne nå at blive betydeligt fortyndet på vej fra emissionsarealerne til de steder ved bygninger og handlingsareal, hvor lufthavnspersonale formodes at opholde sig.



Figur B4.3. Koncentrationer af NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) på forpladsen for vindretning 240° . Kun NO_x -emissioner fra handling. Rød angiver de højeste koncentrationer.

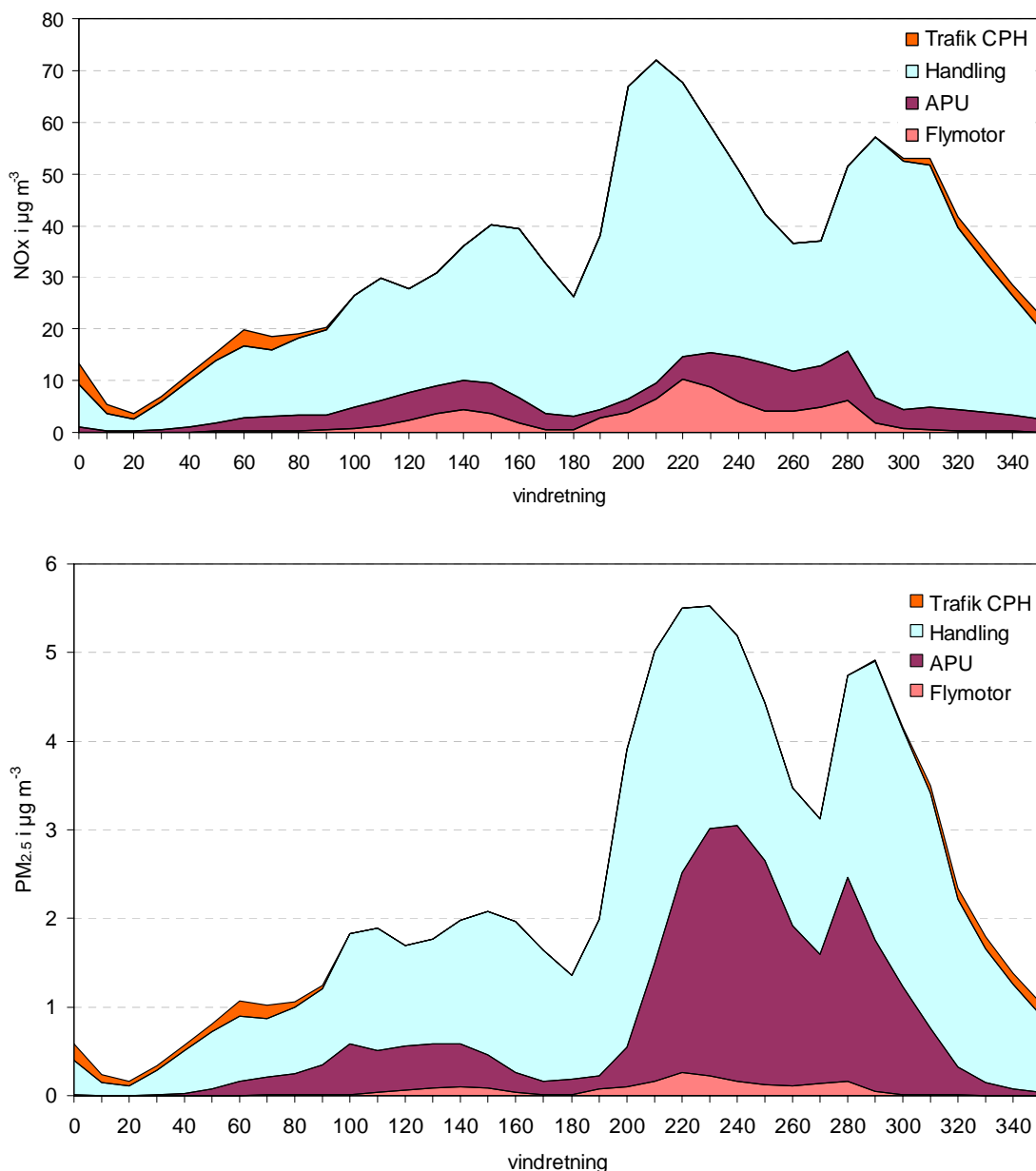


Figur B4.4. Koncentrationer af NO_x ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) på forpladsen for vindretning 240° . Kun NO_x -emissioner fra flymotorer. Rød angiver de højeste koncentrationer.

Vindretningen har selvfølgelig en helt afgørende betydning for, hvilke kilder der bidrager til koncentrationerne på en udvalgt lokalitet. Figur B4.5 (øverst) viser et eksempel for NO_x -koncentrationen beregnet ved Station B4 opdelt i de fire kildegrupper som funktion af vindretning. Ved denne beregning er kildestyrke og vindhastighed antaget at være ens for alle vindretninger. Det største bidrag til NO_x -koncentrationen kommer fra handling, hvilket især ses for sydlige og sydvestlige vindretninger (100 - 320°). Ved disse vindretninger bidrager APU og flymotorer omtrent ligeligt, mens trafik på forpladsen kun udgør et mindre bidrag. Bidrag

fra trafik kommer som forventet mest ved nordlige vindretninger, da trafikklenderne hovedsageligt er placeret nord for B4.

For $PM_{2,5}$ (Figur B4.5 nederst) er det relative bidrag fra APU-emissioner betydeligt større end for NO_x og emissioner fra flymotorer bidrager kun lidt.



Figur B4.5. Koncentration af NO_x og $PM_{2,5}$ ved Station B4 beregnet med MISKAM som funktion af vindretning. Der er antaget en gennemsnitlig emission og der er ikke foretaget en vægtning af vindretningerne. Der er kun taget hensyn til lokale kilder på forpladsen, dvs. bidrag fra andre kilder samt baggrundskoncentration er ikke regnet med.

Årsmiddelmålinger på forpladsen

Figur B4.6 viser modelresultater for hele 2010 for koncentrationerne af NO_x og $PM_{2,5}$ ved Station B4 med både OML og MISKAM. MISKAM og OML viser god overensstemmelse for den samlede NO_x -koncentration, men begge giver koncentrationer, som ligger væsentligt over målingerne. En overestimering ses også for $PM_{2,5}$, selv om den er mindre tydelig

pga. den relativt høje baggrundskoncentration. Mulige grunde for overestimering af modelberegningerne er følgende:

- Der er antaget for høje emissioner på lufthavnsområdet (for høje aktivitetsdata eller for høje emissionsfaktorer)
- I 2010 var der en længere periode uden anvendelse af B2 og B4 på grund af ombygninger. Dette er der ikke taget hensyn til i modelberegningerne.
- I modellerne er der lavet en række antagelser for at beskrive den initiale spredning af udledningerne. Det er muligt, at disse antagelser fører til for lille initialfortynding af udledningerne fra APU og flymotorer.

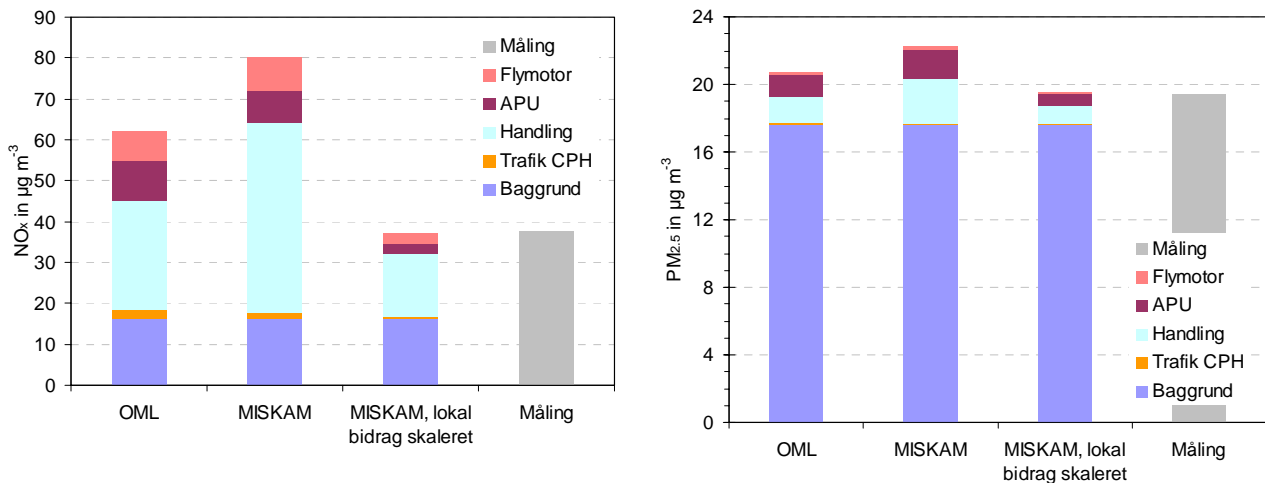
Der er behov for yderligere arbejde for nærmere at belyse årsagen til overestimering i modelberegningerne. Det vurderes dog, at den vigtigste grund til overestimeringen er det første punkt vedrørende for høje emissioner.

Fordeling af koncentrationsbidrag fra de fire kildegrupper er lidt forskellig i de to modelberegninger. Der ses især et højere bidrag fra handling i MISKAM i forhold til OML. Dette skyldes formodentligt den højere rumlige opløsning i MISKAM-modellen, hvor kilderne er placeret med 5 meters nøjagtighed, mens opløsning i OML kun er på 50 meter.

For at matche model og måleresultater blev der lavet et estimat, hvor resultaterne fra MISKAM for de lokale bidrag fra forpladsen blev skaleret med en empirisk faktor. Baggrundskoncentrationerne blev ikke skaleret, da der er relativt god overensstemmelse mellem måleresultater og modelberegninger. Denne metode giver det foreløbigt bedste bud på kildebidragene til NO_x og PM_{2,5}. De relative kildebidrag på Station B4 er vist i Tabel B4.1.

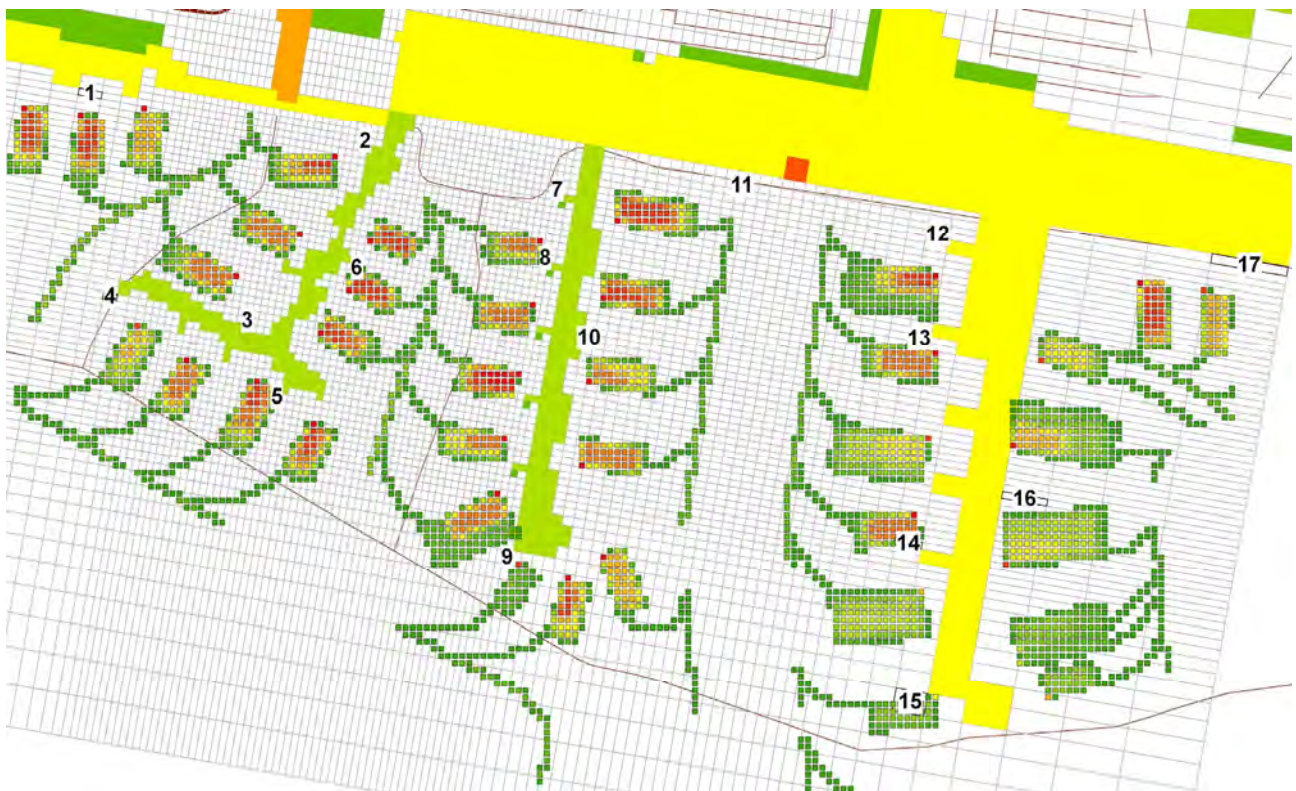
Tabel B4.1. Kildebidrag (i %) til NO_x og PM_{2,5} ved Station B4 estimeret ud fra MISKAM med skalerede lokale bidrag.

Stof	Baggrund	Flymotorer	APU	Handling	Trafik ved lufthavn
NO _x	44	7	7	41	1
PM _{2,5}	90,6	0,4	3,4	5,5	0,1



Figur B4.6. Årsmiddelkoncentrationer for NO_x og $\text{PM}_{2,5}$ ved Station B4 beregnet med OML, MISKAM samt målt i 2010. Endvidere et estimat, hvor alle lokale bidrag (undtagen baggrund) blev skaleret med en faktor på ca. 1/3 for at give overensstemmelse mellem målingerne og modelberegningerne.

For at vise variationen i de samlede koncentrationer samt de forskellige kilebidrag over forpladsen blev der gennemført beregninger for i alt 17 punkter, som er placeret langs terminal- og gatebygningerne, se Figur B4.7.



Figur B4.7. Beliggenhed af de 17 beregningspunkter på forpladsen. Punkt 8 svarer til position af Station B4. Kort viser bygningerne, som de er repræsenteret i gittercellerne i MISKAM-modellen og farverne af bygningerne angiver forskellige bygningshøjder. Figuren viser endvidere fordelingen af emissionerne fra handlingskøretøjerne. Mørkerød angiver højeste emissioner, mens grøn angiver mindst emissioner.

Årsmiddelkoncentrationer for 2010 for de 17 punkter vises i Figur B4.8. Både den samlede koncentration af NO_x og de relative kildebidrag varierer væsentligt mellem de forskellige punkter. Den mindste koncentration beregnes med 24 µg/m³ ved punkt 15 mens den højeste er 47 µg/m³ ved punkt 6, som dermed ligger 25% over niveauet ved station B4.

Baggrunds niveauet med bidrag af kilder udenfor lufthavnen varierer med afstanden til de store trafik kilder (bl.a. Øresundsmotorvejen) udenfor beregningsområdet; højest for punkt 1 og lavest for punkt 15. Bidrag fra den interne trafik på forpladsen er højere for de punkter, som ligger langs hovedterminalbygning og dermed tættere på transportvejen (punkter 1,2,7,11,12,17). Koncentrationsbidrag fra handling varierer stærkt fra punkt til punkt afhængigt af hvor høje handlingsemissionerne er ved de forskellige beregningspunkter. Bidrag fra flyenes hovedmotorer er højest for punkter, som ligger tæt ved taxi- og landingsbaner (punkter 4, 5, 9, 14 og 15), mens APU bidrag er relativt konstant med små variationer fra punkt til punkt.

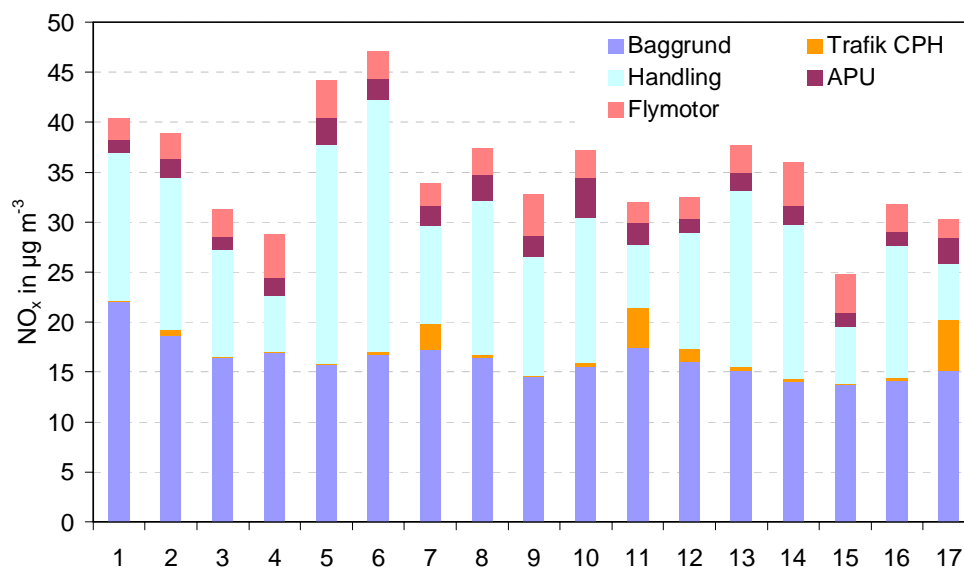


Figure B4.8. Resultater for 17 beregningspunkter (se Figur B4.7). Årsmiddelkoncentrationer af NO_x med angivelse af bidrag for de forskellige kildegrupper. Lokale bidrag er skaleret ned med omkring en faktor 1/3 for at matche målte koncentrationer på Station B4.

Delkonklusion for modelberegninger på forpladsen

Der er udført modelberegninger for lufthavnen og selve forpladsen.

Når usikkerheden på aktivitetsdata, emissionsopgørelser og modelberegninger tages med i betragtning, så er der generelt en rimelig overensstemmelse mellem modelberegninger og måleresultater.

Modelberegningerne viser, at NO_x på forpladsen (ved B4) primært kommer fra baggrund (44%) og handling (41%) med mindre bidrag fra APU (7%), hovedmotorer (7%) og trafik på forpladsen (1%).

Modelberegningerne viser at PM_{2,5} på forpladsen primært kommer fra baggrund (91%) med mindre bidrag fra handling (5.5%), APU (3.4%), hovedmotorer (0,4%) og trafik på forpladsen (0,1%).

Modellen giver navnlig for høje koncentrationer for NO_x på forpladsen. Undersøgelser peger på, at det er emissionerne på forpladsen, som er for høje. Der er derfor behov for at genvurdere de aktivitetsdata, som emissionsopgørelsen er bygget på. Ovenstående vurdering af kilderne skal tages med forbehold for denne usikkerhed.

For at illustrere variationen over forpladsen, blev der beregnet koncentrationer og kildefordeling for 17 punkter langs terminalbygning (Figur B4.8).

Tabel B4.2 viser gennemsnitlige NO_x-koncentrationer for de 17 punkter, den gennemsnitlige relative bidrag af de forskellige kilder og minimum/maksimum værdier for deres kildebidrag blandt alle punkter.

Tabel B4.2. Kildebidrag til NO_x for 17 punkter på forpladsen (se position i Figur B4.8) estimeret ud fra MISKAM med skalerede lokale bidrag.

NO _x	Baggrund	Flymotorer	APU	Handling	Trafik CPH
Gennemsnit (µg/m ³)	16	3	2	13	1
Andel (%)	46	8	6	37	3
Andel Min (%)	35	5	3	19	0,3
Andel Max (%)	59	15	11	54	17

Modelberegningerne for de 17 punkter på forpladsen viser, at NO_x primært kommer fra baggrund (46%; min 35%- max 59%) og handling (37%; 19-54%) med mindre bidrag fra APU (6%; 3-11%) , hovedmotorer (8%; 5-15%) og trafik på forpladsen (3%; 0.3-17%).

Referencer

Eichhorn, 1996: Validation of a microscale pollution dispersal model. in: Air Pollution Modelling and its Application IX. New York, London, Plenum Press. pp. 539-548.

Olesen, H. R., Berkowicz, R., Ketzel, M. and Løfstrøm, P. (2009): Validation of OML, Aermod/Prime and Miskam Using the Thompson Wind-Tunnel Dataset for Simple Stack-Building Configurations. Boundary-Layer Meteorology 131, 73-83.

Lohmeyer, 2011:

<http://www.lohmeyer.de/eng/Software/winmiskam.htm>

UNDERSØGELSE AF LUFTFORURENINGEN PÅ FORPLADSEN I KØBENHAVNS LUFTHAVN KASTRUP I RELATION TIL ARBEJDSMILJØ

DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi, Aarhus Universitet har i perioden 2009 til 2011 lavet en undersøgelse af luftkvalitet på forpladsen i Københavns Lufthavn Kastrup i relation til arbejdsmiljø. Undersøgelsen, der er udført for Københavns Lufthavne A/S, omfatter målinger af luftforureningen på forpladsen, udarbejdelse af emissionsopgørelse for Københavns Lufthavn Kastrup og modelberegninger af luftforureningen på basis af emissionsopgørelsen. Kvælstofoxider, massen af partikler med diameter under $2,5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2,5}$), partikelantal og udvalgte organiske luftforureningskomponenter (herunder polycykliske aromatiske hydrocarboner) har indgået i undersøgelsen. Resultaterne viser, at koncentrationsniveauerne for hovedparten af de undersøgte luftforureningskomponenter ligger på niveau med eller under niveauet på H.C. Andersens Boulevard, som er en af de mest trafikerede gader i København. Undtagen partikelantal, som ligger på et niveau, der er to til tre gange højere end på H.C. Andersens Boulevard. Undersøgelsen har vist, at de vigtigste kilder til luftforureningen er handlingskøretøjer, flyenes hovedmotorer og hjælpemotorer (APU).