

Morten Winther, Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Systemanalyse

Uffe Kousgaard, Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Systemanalyse

Arne Oxbøl, DK-teknik

Beregning af lugtudsendelsen fra flymotorer i Københavns Lufthavn

1. Indledning

Miljøstyrelsen har i en rammegodkendelse af støj og luftforurening fra afvikling af flytrafik i Københavns Lufthavn pålagt lufthavnen at undersøge omfanget af lugtgener fra uforbrændt brændstof i lufthavnens omgivelser. Undersøgelsen skal være afsluttet senest ved udgangen af 2003, og det er planen at kvantificere lugtgenerne ved brug af spredningsberegninger, der bygger på meteorologisk statistik og en lugtopgørelse i tid og sted.

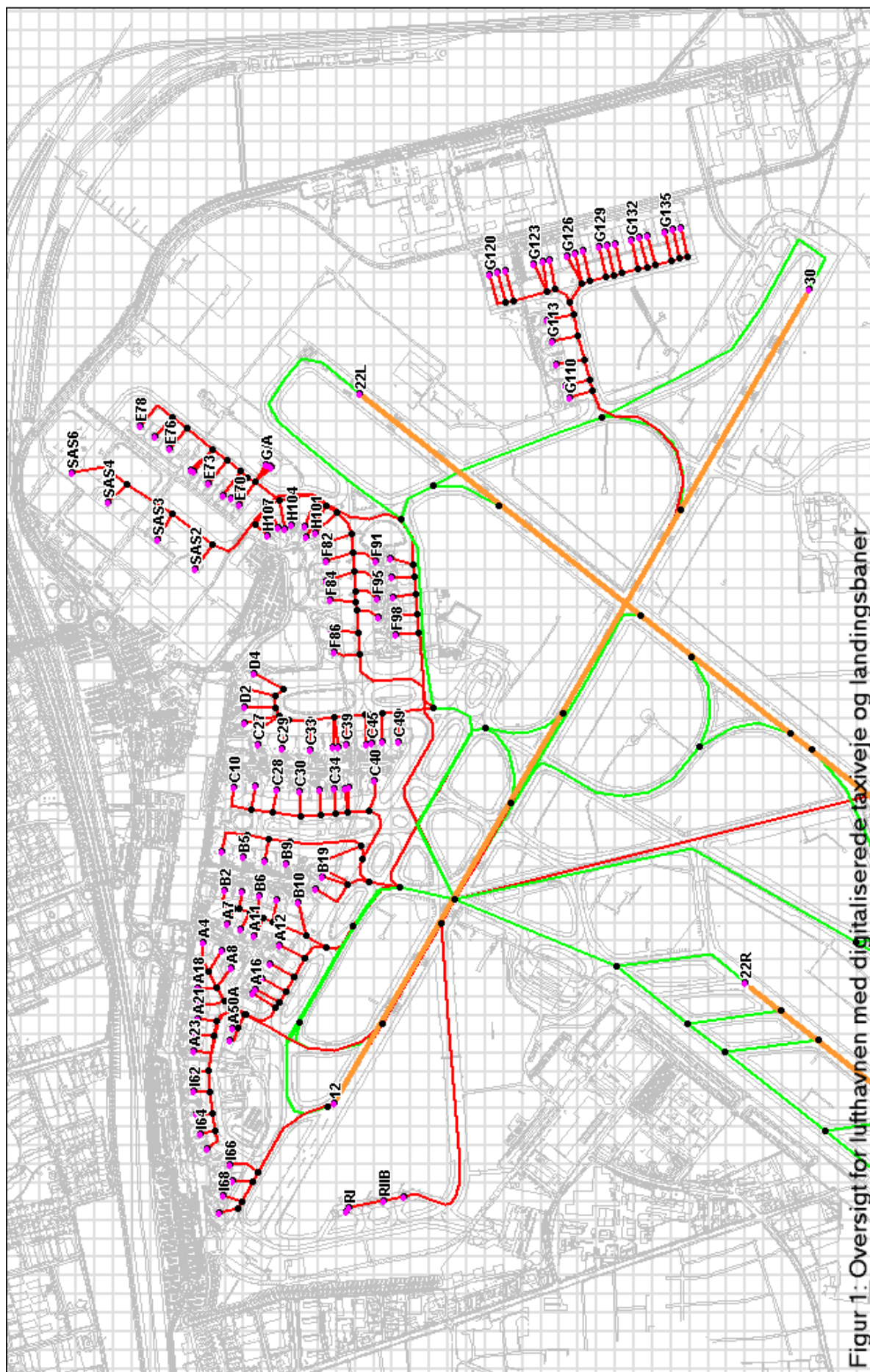
På selve lufthavnens område benytter flyene helt karakteristisk enten fuld motorbelastning ved start på startbanen eller lave motorbelastninger lige efter landing, ved taxifart på rulleveje og ved ankomst eller afgang fra standplads. Derudover gør flyene brug af hjælpemotorer (APU: Auxiliary Power Unit) ved standpladsen til produktion af elektricitet, drift af air condition anlæg, start af hovedmotorer m.m. Flymotorernes drift producerer en vis emission og skaber dermed også lugtgener i større eller mindre grad.

Denne artikel dokumenterer beregningen af lugtudsendelsen fra flyenes hovedmotorer og APU på lufthavnens område i Københavns Lufthavn som den varierer i tid og sted. Udgangspunktet er at bestemme lugtudsendelsen fra nogle få repræsentative flymotorer og motorbelastninger. Hertil bruges emissionsmålinger og lugtpanelundersøgelser. Næste skridt er at beregne lugtudsendelsen fra alle fly i lufthavnen i tid og sted ved at kombinere de opstillede lugtværdier med operationsdata og flytekniske oplysninger.

Især pga. manglende operationsdata forsøges det ikke at kvantificere evt. lugtgener ved motorstart og –opvarmning samt motortests. Undladelsen af disse lugtbidrag vurderes dog kun at kunne påvirke det endelige resultat i marginal grad. Udenfor den her forklarede del af projektet er det videre målet at bestemmes de endelige lugtkoncentrationer fordelt i tid og rum vha. spredningsberegninger, hvor lugtopgørelsen kombineres med meteorologisk statistik.

2. Metode

Det overordnede princip for undersøgelsen er at kombinere 1) konkrete målinger af lugt, emissioner og brændstofforbrug for udvalgte flymotorer, 2) digitaliserede flyoperationer ud fra Københavns Lufthavns oplyste operationsdata, og 3) motorspecifikke brændstofforbrug for de fly der flyver på Københavns Lufthavn. Til projektet har Københavns Lufthavn tilsendt et elektronisk kort over lufthavnens område og har oplyst data for flyaktiviteten i seks travle hverdagsdøgn med fortrinsvis brug af hver af de seks startbaner. 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 50X50 m til understøtning af de videre spredningsberegninger for luftkvalitet.



Figur 1: Oversigt for lufthavnen med digitaliserede taxiveje og landingsbaner

2.1 Digitalisering af flyoperationsdata

På figur 1 er alle standpladser (133) markeret som et violet punkt, og flyenes rulleveje er markeret med røde linjer frem til de fælles rulleveje, der er markeret med grønne linjer. De 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.

Standpladsen

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.

Taxituren før start

Københavns Lufthavns dokumentation ifm. kortlægning af støjproblemer er brugt til at fastlægge præferencerullevejene (Delta Akustik, 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 forbrugt 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 lufthavnen oplysninger om brugt banelængde under accelerationen og sluthastigheden, når hjulene slipper asfalten (Jeppesen, 2003). Flyene opdeles til denne brug i de samme seks vægtklasser; 0-30, 30-50, 50-70, 70-120, 120-300 og > 300 tons maksimal startvægt (MTOW), der bruges i lufthavns støjberegninger (Delta Akustik, 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.

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 (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 (1). 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. Hastigheden beregnet med (4) kan godt være større end 8 m/s, og omvendt vil en evt. køtid blot bidrage til at sænke den gennemsnitlige taxihastighed.

Brug af hjælpemotorer

Af miljøhensyn er der restriktioner på brugen af hjælpemotorer, når flyene holder parkeret ved deres standplads. Ud fra lufthavnens oplysninger regnes der med, at hjælpemotorerne bruges fem minutter før off-block tid og fem minutter efter on-block tid.

2.2 Sammenhæng mellem fly registreringsnr. og motordata

Til brug for de videre lugtberegninger skal brændstofforbruget findes for de enkelte fly (angivet ved fly ID), der benytter lufthavnen. Første trin er at finde oplysninger om de enkelte flys motorfabrikat (motor ID) i en global database ”jp airline-fleets international 2003/2004” over alle fly (Klee, 2003). Næste skridt er at finde motorernes præcise brændstofforbrug (og emissionsdata) for belastningen ved taxifart og start. Hertil bruges ICAOs Engine Exhaust Emission Database for jetmotorer med en trykkraft over 26,7 kN (ICAO, 1995). For turbopropmotorer og små jetmotorer bruges data tilsendt fra FOI (Tötaforsvarets Forskningsinstitut) i Sverige, der delvis kan genfindes i EMEP/CORINAIR (2002).

Tabel 1 De mest brugte jet- og turbopropmotorer i Københavns Lufthavn (seks udvalgte dage)

Jetmotorer			Turbopropmotorer		
Motor ID	Operationer	Op. Andel	Motor ID	Operationer	Op. Andel
JT8D-217C	929	26,7	PW150A	511	38,8
JT8D-219	305	8,8	PW120	239	18,1
CFM56-3C1	261	7,5	PW125B	127	9,6
CFM56-7B20	246	7,1	PW127F	126	9,6
LF507-1F	235	6,8	PW123	56	4,3
CF34-3B1	164	4,7	PT6A-34	44	3,3
CFM56-7B26	125	3,6	AE2100A	43	3,3
V2525-D5	114	3,3	CT7-5A2	40	3,0
V2533-A5	108	3,1	TPE331-12U-701G	24	1,8
AE3007A1	97	2,8	PW124B	19	1,4
Øvrige	894	25,7	Øvrige	88	6,7

Selvom tabel 1 kun viser de mest almindeligt forekommende fly motorer for hhv. jet- og turbopropfly, er det samlet set lykkedes at tildele langt de fleste fly ID præcise motordata. De tiloversblevne fly har fået tildelt repræsentative motordata for en lignende flytype udfra et kvalificeret skøn.

2.3 Målinger af lugt, emissioner og brændstofforbrug

Af ressourcemæssige årsager har der kun været mulighed for at udføre en begrænset mængde målinger i projektet. Fra start er det derfor valgt at udføre målinger på en ofte benyttet motortype JT8D-219 (flytype MD80), hvis emissioner pr. kg forbrugt brændstof placerer sig rimeligt i forhold til alle de brugte jetmotorers gennemsnit iht. ICAOs database. Flytypen er den mest brugte i lufthavnen i de dage operationsdata dækker. Målingerne er gjort af DK-teknik hos Volvo i Sverige (Bromma) og er beskrevet af Oxbøl (2003a).

I forbindelse med vurderingen af motorens repræsentativitet skal det bemærkes, at den mest benyttede jetmotortype JT8D-217C i mange tilfælde er identisk med JT8D-219, men har specielt lave emissioner i tilfælde, hvor den er leveret med emissionsbegrænsende udstyr. Netop derfor anses denne motor ikke for et godt valg ved emissions- og lugtmålinger.

Derudover er der foretaget målinger i Københavns Lufthavn på en APU motor (Honeywell GTCP 131-9A, 131 HK) installeret i et SAS Airbus 321-200 fly (Oxbøl, 2003b). Samme APU motor bruges også i SAS B737 og MD90 flytyper og kan dermed siges at være repræsentativ for en stor del af flyene i lufthavnen. Til indkøring af forsøgsmetode og valg af måleudstyr for den grundliggende måleserie på jetmotoren, blev der før forsøgene i Sverige målt på en turboprop motor (Garreth TPE 331-5) i Roskilde Lufthavn, se Oxbøl (2003c).

Ved forsøgene er udstødningsgassen opsamlet i poser til senere kemisk analyse og lugtforsøg, samtidigt med at motorens øjeblikkelige brændstofforbrug er registreret. Fortyndingsforholdet i den opsamlede prøve bestemmes ud fra forholdet mellem den faktiske CO₂-koncentration i posen (korrigeret for atmosfærens bidrag) og den teoretiske CO₂-koncentration i den rå udstødningsgas ved fuldstændig forbrænding.

Ved det efterfølgende lugtforsøg er der dannet et lugtpanel af personer efter Miljøstyrelsens regler (Vejledning nr. 4, 1985) og europæiske standarder (PrEN 13725). Princippet er at lade personerne lugte til kraftigt fortyndede prøver af posernes indhold. Ved gradvist at sænke fortyndingen findes koncentrationen, hvor 50% af panelets deltagere kan lugte noget i prøven. Denne fortynding fastlægger 1 lugtenhed (LE). Udfra CO₂-koncentrationen ved denne fortynding regnes tilbage til hvor mange lugtenheder der er i den ufortyndede udstødningsgas. Når de tilbageregne værdier sammenholdes med motorens specifikke brændstofforbrug, kan lugtudsendelsen pr. sekund (LE/s) findes ved den betragtede motorbelastning.

Tabel 2 Brændstofs specifikke lugt- og emissionsfaktorer beregnet udfra målinger

Motor	Driftsituation	HC	Nox	Lugt	Brændstof
		[g/kg fuel]	[g/kg fuel]	[LE/kg fuel]	[kg/s]
Jet (JT8D-219)	Tomgang	3,1	5,5	240.000	0,13
	Start	2,2	19,0	440.000	1,4
TP (Garreth TPE 331-5)	Tomgang	9,9	4,3	2.300.000	0,025
	Start	2,0	8,2	350.000	0,052
APU (Honeywell GTCP 131-9A)	Normal drift	0,46	3,1	58.000	0,013

En sammenligning mellem den målte jet og turbopropmotor skal gøres med stor forsigtighed, da målingerne ikke er udført samme sted og under identiske forsøgsbetingelser. Motorindstillingen er således fastsat ud fra testlaboratoriet/flyoperatørens egen driftserfaring.

Det ses dog at turboprop-motorens lugttal pr. kg brændstof er næsten 10 gange så store som jetmotorens ved en motorbelastning svarende til taxifart. Da en nærmere analyse af operationsdata og forbrugstal viser, at et gennemsnitligt turbopropfly i lufthavnen bruger omtrent halvt så meget fuel som et gennemsnitligt jettfly ved taxifart, kan lugtudsendelsen altså blive stor for den første flytype. Ved start er der en indikation af lidt mindre lugt og emissioner pr. kg fuel for turboprop- end for jetmotoren. Sammenholdt med et over 15 gange større fuelforbrug for jets ved start i lufthavnen er lugtgenerne for turbopropfly måske et mindre problem i denne fase.

For at kunne give et mere præcist billede af lugtudsendelsen fra turbopropmotorerne, især ved taxifart, vil der i den videre del af projektet blive arbejdet på at fremskaffe målinger på den mest brugte turboprop motor i Københavns Lufthavn – PW150A – der sidder i SAS' Dash8-Q400. Motorens emissioner placerer sig rimeligt i forhold til andre turbopropmotorers gennemsnit iht. de brugte data fra FOI.

3. Resultater

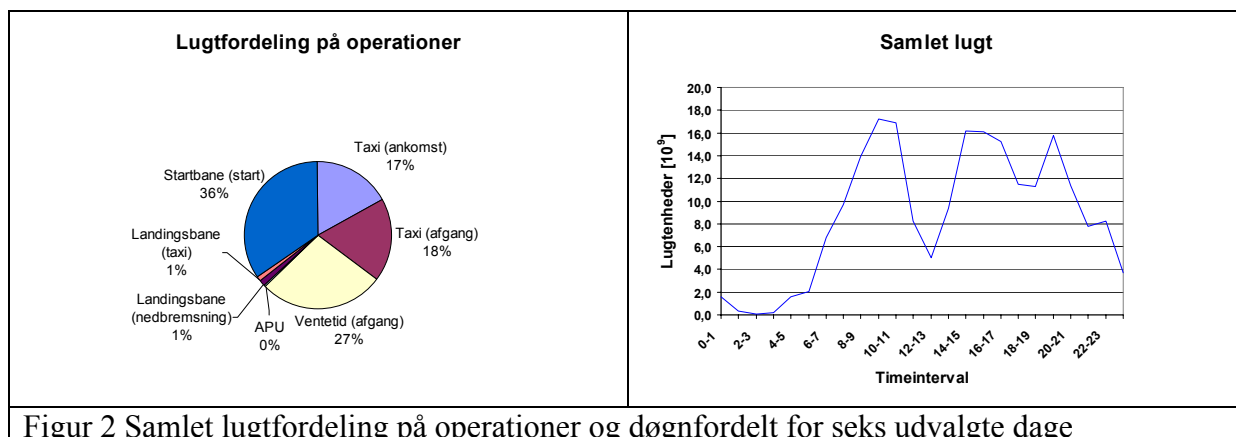
Det ses at lugten fra forskellige former for taxioperationer i lufthavnen udgør næsten to tredjedele af den samlede beregnede lugt for de seks dage der er udvalgt flyoperationer for. Lugten udsendt ved fuld motorbelastning under start udgør over en tredjedel, mens lugten fra APU er marginal. Viser det sig ved nye målinger, at turbopropmotorernes lugt ved taxibelastning er drastisk større, vil lugtandelen for taxioperationer også forhøjes væsentligt. Alligevel kan det ikke sluttes, at lugten fra flyenes taxifart vil udgøre et stort problem for lufthavnens omgivelser.

Lugten ved start giver i sig selv et højt absolut bidrag, og kendetegnende for flystarten udsendes emissionerne og lugten fra motoren i et kort tidsrum og på et relativt begrænset område. Derudover afhænger det i høj grad af de vejræssige omstændigheder, om den udsendte lugt transporteres i tilstrækkeligt høje koncentrationer til områder i lufthavnens nærhed, hvor mennesker bor og færdes, sådan at lugtgener opstår. Derfor kan det først med rimelighed konkluderes, hvilke flyaktiviteter der skaber de største lugtproblemer, når spredningsberegningerne er gennemført.

Størst lugt udsender flymotorerne på tidspunkterne med stor flyaktivitet, dvs. mellem 9 og 11 om formiddagen, i perioder om eftermiddagen og om aftenen mellem 19 og 21. Der er en vis usikkerhed på lugtberegningerne hvad bidraget for ventetid angår. Således beregner modellen meget lugt relateret til ventetid også i den stille periode midt på dagen mellem kl. 11 og kl. 13. Om lugtbidraget medtages under taxifart før start eller ved kø, er dog udelukkende et allokeringsspørgsmål og vurderes til kun at få en ringe indflydelse på det samlede resultat. Der skal videre i projektet fremskaffes en forklaring på de store ventetider midt på dagen, og derfra kan det besluttes, om modellen skal justeres.

Figur 3 viser den beregnede lugt fra et MD80 fly fra det forlader standpladsen B8 (med fem minutters APU drift før off-block tid) til det starter på bane 30. Det skal bemærkes at lugtskalaen på det største trin dækker over et stort interval. Taxiemissionerne bliver spredt over et relativt stort område og i et tidsinterval på 35 minutter, hvoraf størstedelen er køtid før

start. Rullevejen afviger lidt fra den mest logiske, med en afstikker op til den såkaldte ”7-stjerne”. Digitaliseringen af rullevejen er fastlagt ud fra hensynet til konsistens med princippet bag lufthavnens støjberegningsprogram.



Figur 2 Samlet lugtfordeling på operationer og døgnfordelt for seks udvalgte dage

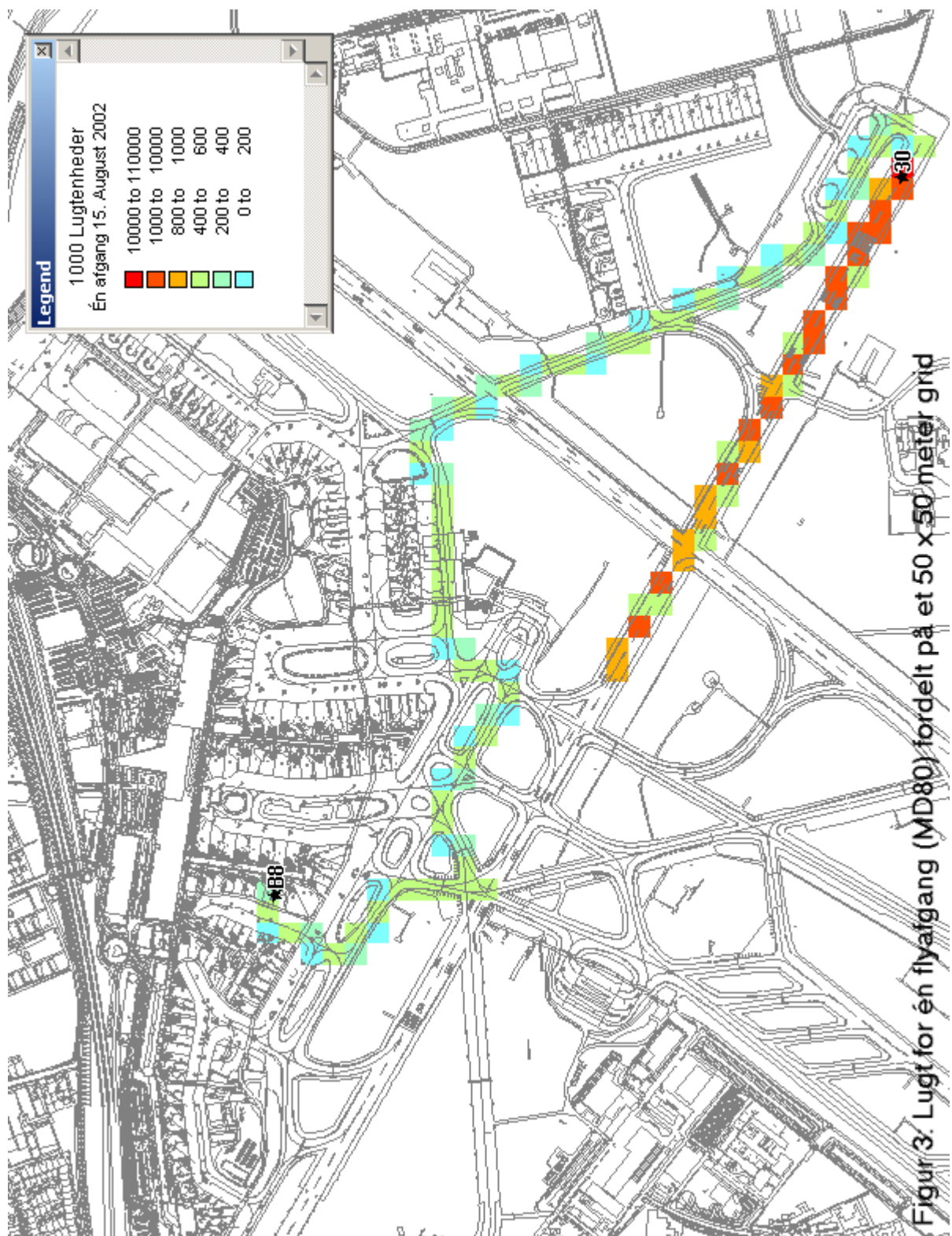
Lugtudsændelsen i hver celle varierer under taxifarten og skyldes, at flyets rullevej ikke er parallel med cellernes orientering. På den første del af flystarten er lugtudsændelsen i hver celle meget stor og aftager så gradvist. Grunden er, at flyet kommer op i fart og derfor befinder sig i hver celle i kortere og kortere tid.

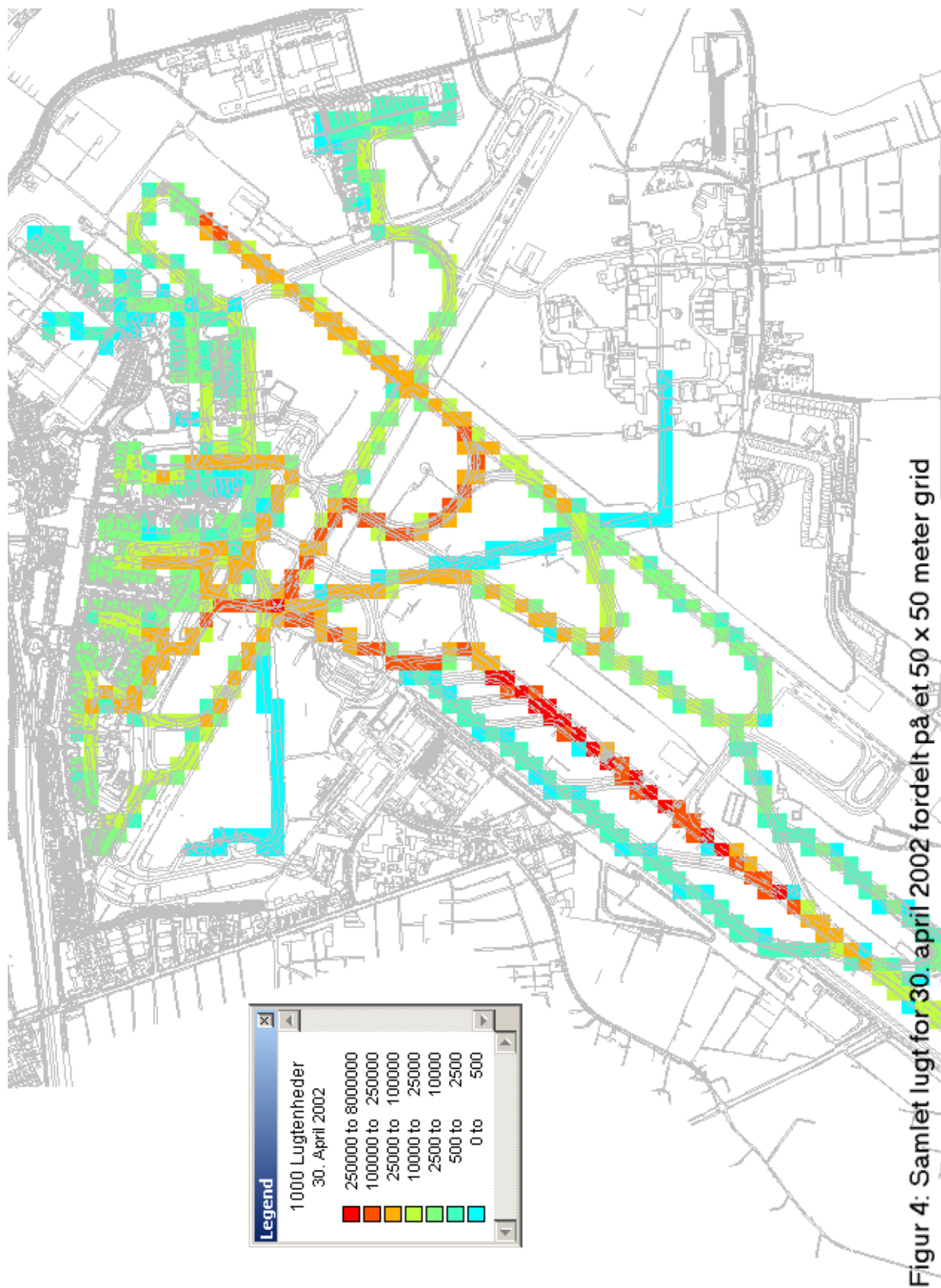
Tabel 3 Operationerne d. 30 april 2002 opdelt efter type, anvendt bane og antal

Operation	Bane	Antal operationer
Landing	04L	7
Landing	22L	358
Landing	22R	14
Landing	30	10
Start	04R	1
Start	12	9
Start	22L	34
Start	22R	340

På figur 4 vises den samlede beregnede lugt for én af de udvalgte dage (d. 30. april 2002), hvor starterne fortrinsvist er gjort på bane 22R og landingerne på bane 22L. Bemærk at lugtskalaen ikke er lineær, men derimod stiger kraftigt for hvert trin. De beregnede lugtbidrag fra starterne på 22R er langt de største, men en begrænset mængde landinger på samme bane giver også et lille bidrag fra taxifarten tilbage mod 7-stjernepunktet.

Ved landing på 22L ses det tydeligt, at mange (mindre) fly bruger afkørslen relativt kort fra landingspunktet, og at flyene i færre og færre antal (de største fly) bruger afkørslerne, efterhånden som afstanden stiger fra selve landingspunktet. Der er markeret en tydelig stor lugt ved taxifart frem mod start på 22R og ved taxifart efter landing på 22L (især den korte afkørsel). Lugten er også særlig stor i 7-stjernepunktet, hvor de fleste rulleveje krydser hinanden, og på de fælles rulleveje tæt ved A, B og C fingrene.





4. Konklusion

Det viser sig, at lugtbidraget fra taxifart udgør næsten to tredjedele af den samlede opgjorte lugt i lufthavnen for de seks udvalgte dage. Lugtbidraget fra starter udgør over en tredjedel, mens lugten fra APU motorer er marginal. Kendetegnende for flymotorernes lugt og emissioner ved taxifart er, at de udsendes på et relativt stort område, mens udsendelsen ved start sker på et lille område og indenfor et smalt tidsinterval. Derudover afhænger det i høj grad af meteorologiske forhold, hvordan lugten efterfølgende spredes. Alt taget i betragtning er det først rimeligt at drage endelige konklusioner om hovedårsagen til evt. lugtgener i lufthavnens nærhed, når lugtkoncentrationerne foreligger som et resultat af spredningsberegningerne.

Der er en vis usikkerhed på lugtberegningerne hvad bidraget for ventetid angår. Om lugtbidraget medtages under taxifart før start eller ved kø, er dog udelukkende et allokeringssspørgsmål og vil kun have ringe indflydelse på det samlede resultat. Det kan dog komme på tale ændre på beregningsmodellens forudsætninger, såfremt en nærmere forklaring på de store ventetider midt på dagen peger på et behov for en justering af modellen.

I den resterende del af projektet skal undersøgelsen udvides til også inddrage lugtbidragene for fly i luften lige før landing og lige efter start. I forlængelse af dette skal helikopteroperationerne også medtages. For at kunne bestemme lugtbidraget bedre fra turbopropfly især i taxifart, skal det tilstræbes at udføre målinger på en motor af typen PW 150A, der bruges i det hyppigst forekommende turbopropfly (Dash8-Q400) i lufthavnen.

5. Referencer

Delta Akustik (1997): Københavns Lufthavn Kastrup. Støj fra flytrafik i 1996 – AV 248/97.

EMEP/CORINAIR Emission Inventory Guidebook - 3rd edition October 2002 UPDATE Technical report No 30. European Environment Agency, Copenhagen (tilgængelig på adressen <http://reports.eea.eu.int/EMEPCORINAIR3/en>).

ICAO (1995): ICAO Engine Exhaust Emissions Data Bank, Doc 9646-AN/943, First Edition - 1995, ICAO, Montreal (tilgængelig på adressen www.qinetiq.com/aircraft/aviation.html).

Jeppesen B.: (2003): Pers. comm. Birger Jeppesen, Miljøafdelingen i Københavns Lufthavn, 2003.

Klee, U. (ed. 2003): jp airline - fleets international 2003/2004, 37rd edition, Bücher & Co. Publikationen, Zurich-Airport, Switzerland, ISBN NO: 3-85758-137-9.

Oxbøl (2003a): Måling af lugt fra MD80 motor. Arbejdsnotat, DK-teknik, 2003.

Oxbøl (2003b): Måling af lugt fra APU motor. Arbejdsnotat, DK-teknik, 2003.

Oxbøl (2003c): Måling af lugt fra turboprop motor. Arbejdsnotat, DK-teknik, 2003.