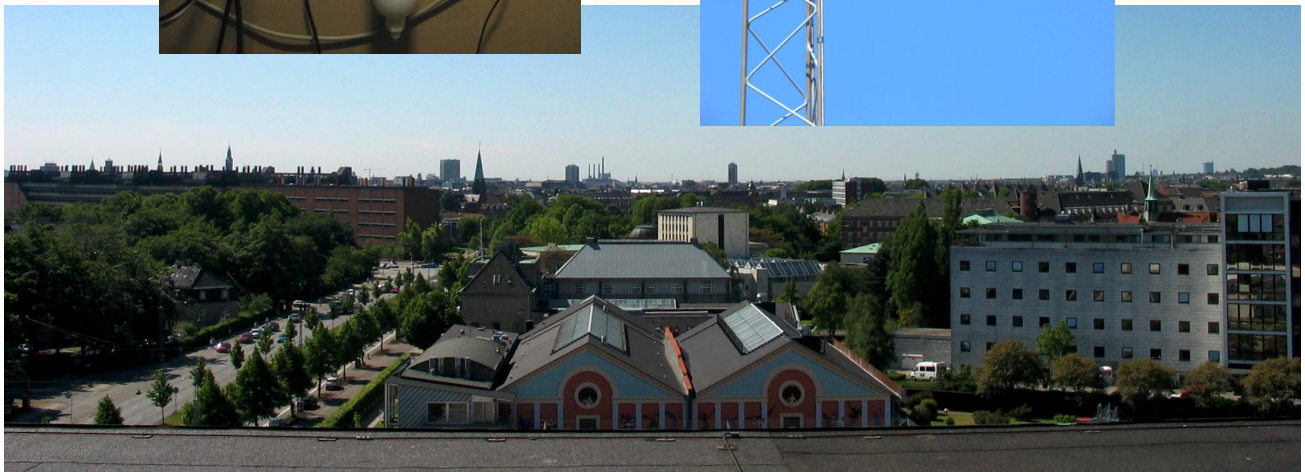


Undersøgelse af metode til måling af partikelflux i et urbant område

- Analyse af eddykorrelationsmålinger af partikel- og CO₂fluxe i København



Specialeafhandling i naturgeografi
Pia Viuf

Vejleder: Henrik Søgaard, Geografisk Institut, Københavns Universitet
Ekstern vejleder: Ruwim Berkowicz, ATMI, Danmarks Miljøundersøgelser

Afleveret: 17/02/06

Eddykorrelationsmålinger af partikel-og CO₂fluxe i København

-Undersøgelse af målemetode for partikelflux i et urbant område

Resumé

Fokus på ultrafine partikler er steget de seneste par år pga. ny forskning, der har afsløret at disse er mere sundhedsskadelige end de større partikler. Det er ligeledes de mindste partikler der har den største effekt på strålingsbalancen ift. større partikler. For at kende transporten af disse partikler skal der anvendes målinger af fluxen, hvilket er foretaget i Edinburg, Skotland (Dorsey et al., 2002) og Stockholm, Sverige (Mårtesson et al., 2003), men indtil nu ikke i Danmark.

I dette projekt er der foretaget målinger af partikel- og CO₂fluxe med eddykorrelationsmetoden, fra taget H. C. Ørsteds Institutet i København. Lokaliteten var dog ikke optimal, og taget påvirkede turbulensen således, at målinger fra udvalgte vindretninger måtte frasorteres.

De målte partikelfluxer har en gennemsnitlig døgnvariation på minimum på 1000 partikler cm⁻² s⁻¹ i nattetimerne og maksimum på 8000 partikler cm⁻² s⁻¹ i morgenmyldretiden. Dette er forholdsvist lavt, hvilket dels skyldes lave emissioner og gunstige vejrforhold i København og dels et tab i målesystemet. Tabet pga. instrumenteringen er undersøgt ift. diffusionstab i røret og tab pga. reaktionstiden i partikeltælleren. Disse har dæmpet målingerne af koncentrationen med 18% og af fluxen med 20%.

Partikelfluxene er relateret til trafikintensiteten og CO₂ fluxene, og udviste som forventet en høj korrelation.

Fremtidige partikelfluxmålinger i København bør foretages fra målestationer, der er frie af bygningernes turbulensfelt, samt med enkelte korrektioner til opstillingen og instrumenteringen ift. dette projekt.

Nøgleord: Partikler, eddykorrelation, bymiljø, turbulens, CO₂.

Eddy covariance measurements of particle and CO₂ fluxes in Copenhagen

-Examination of a method for measurements of particle fluxes in an urban area

Abstract

The focus on nanoparticles has increased in recent years. Partly due to new research that reveals this sizefraction as more hazardous to human health than the larger particles, and partly due to the smaller particles having a greater affect on the radiation balance.

To estimate the transport of the particles, it is necessary to measure the particle flux. This has been done in Edinburgh, Scotland (Dorsey et al., 2002) and Stockholm, Sweden (Mårtensson et al., 2003), but until now not in Denmark.

Measurements of particle- and CO₂fluxes have been carried out from the roof of the H.C. Ørsted Institute, Copenhagen.

The roof itself affected the turbulence to such degree, that measurements from certain wind directions had to be disregarded.

The particle fluxes have an average diurnal variation of minimum of 1000 particles cm⁻² s⁻¹ during the night and maximum 8000 particles cm⁻² s⁻¹ during the morning rush hour. These fluxes are relatively low partly due to low emissions and favourable weather conditions in Copenhagen, and partly due to losses in the measurement.

The loss due to deposition in the tube by diffusion and loss in flux due to the slow response of the particle counter has both been assessed to 20%.

The particle fluxes have been related to the traffic intensity and the CO₂fluxes which both showed a high correlation as expected.

Future measurements of particle fluxes in Copenhagen should be conducted from locations without turbulence interference from buildings and with few simple corrections compared to this project to avoid the above mentioned dampening.

Keywords: Particles, eddy covariance, urban environment, turbulence, CO₂

INHOLDSFORTEGNELSE

1. INDLEDNING.....	5
1.2 PROBLEMFOMULERING	9
2. TEORI.....	11
2.1 TURBULENS.....	11
2.1.1 Turbulensintensiteten.....	12
2.1.2 Similaritetsteori.....	12
2.1.2.1 Monin- Obukhov længde.....	12
2.1.2.2 Det logaritmiske vindprofil.....	13
2.2 SPEKTRALANALYSE	14
2.3 BYKLIMA	18
2.3.1 Turbulens i byrummet.....	21
2.3.2 Spredning af forurening i byrummet	23
2.5 EDDYKORRELATION.....	23
2.5.1 Kildeområder	27
2.6 PARTIKLER.....	28
2.6.1 Måling af partikler	29
2.6.2 Måling af partikelfluxer	31
2.6.3 Påvirkning af strålingsbalancen	31
2.6.4 Helbredseffekterne af partikelforurening.....	32
2.6.5 Lovgivning og regulering	32
3 METODE.....	35
3.1 DATAINDSAMLING	35
3.1.1 LOKALITETSBEKRIVELSE.....	35
3.2 MÅLEPERIODE.....	39
3.3 INSTRUMENTERING	41
3.3.1 Partikeltæller.....	41
3.3.2 CO ₂ gasanalysator.....	43
3.3.3 Sonisk anemometer.....	43
3.3.4 Thermocouple	44
3.3.5 Opstilling	44
3.4 DATABEHANDLING.....	46
3.4.1 Opsamlingsfrekvens og midlingsperiode.....	46
3.4.2 Beregning af spektre	46
3.4.3 EdiRe	47
Omregning af partikelkoncentration fra output	47
3.4.4 Beregning af forsinkelse af signaler	47
3.4.4.1 Bestemmelse af lagtime ved maxkorrelations metoden.....	48

3.4.5 Detrending	50
3.4.6 Statistiske beregninger.....	51
3.4.6.1 Standardafvigelse og R^2	51
3.4.6.2 Stationaritets-procent.....	51
3.4.7 Dæmpning af partikelkoncentration og flux i røret	52
3.4.8 CPC's reaktionstid- Tidskonstanten Tau.....	56
3.4.9 Korrektion for dæmpning af partikelflux	58
4 RESULTATER OG DISKUSSION	61
4.1 RÅDATA.....	61
4.1.1 Vindmålinger	61
4.1.2 Partikelmålinger.....	63
4.1.3 CO ₂ målinger	66
4.2 SPEKTRALANALYSE	68
4.2.1 U og W spektre	68
4.2.2 CO ₂ - og partikelspektre	71
4.3 STABILITETSFORHOLD	72
4.3.1 Varmeflux	74
4.4 KARAKTERISTIK AF TURBULENSEN	76
4.4.1 Den vertikale vindkomponent	76
4.4.2 Momentumflux og friktionshastighed	79
4.4.3 Ruhedslængden, Z_0	80
4.5 CO ₂ OG PARTIKLER	81
4.5.1 Døgn- uge og årstidsvariationer	82
4.5.1.1 CO ₂	82
4.5.1.2 Partikler	87
4.5.2 CO ₂ og partikelflux i forhold til trafikvariation.....	92
4.5.3 CO ₂ og partikelmålinger i forhold til vindretninger	95
4.6 KORREKTIONER TIL FLUX-BEREGNINGER.....	97
4.6.1 Dæmpning af signal i rør og CPC	97
4.6.2 Horst's korrektion af flux	98
4.7 SAMLET VURDERING AF FEJLKILDER.....	100
5 KONKLUSION	103
6 PERSPEKTIVERING	105
7 TAK TIL.....	107
8 LITTERATUR.....	109
SYMBOL LISTE.....	115
APPENDIKS	116

1. Indledning

Vi lever, ånder og forurener på ét og samme sted, hvilket for de fleste af os er i byområder. Mens verdens samlede befolkning er fordoblet siden 1950, er bybefolkningen 4-doblet og bilparken 10-doblet (Fenger, 1999). Det er derfor nødvendigt at øge den samlede viden om forureningen af vores byluft, og transporten af denne forurening. Ikke kun for at sikre et behageligt og sundt miljø for den voksende bybefolkning, men også for at sikre at den øgede bydannelse, og dermed de koncentrerede forureningskilder, ikke udgør et globalt problem.

Det har længe været velkendt, at byluft ikke er sundt at indånde, hvilket der har været skiftende årsager til gennem tiden. Fra de mange kulovne til opvarmning og madlavning, den begyndende industri, og over til den høje koncentration af biltrafik, der i dag udgør den største kilde til forurening af byluften. Men det er ikke kun i byerne, at øgede udslip af forurenende stoffer til atmosfæren udgør et problem. På regionalt og globalt plan er de øgede emissioner en trussel mod menneskers helbred og mod klimaet.

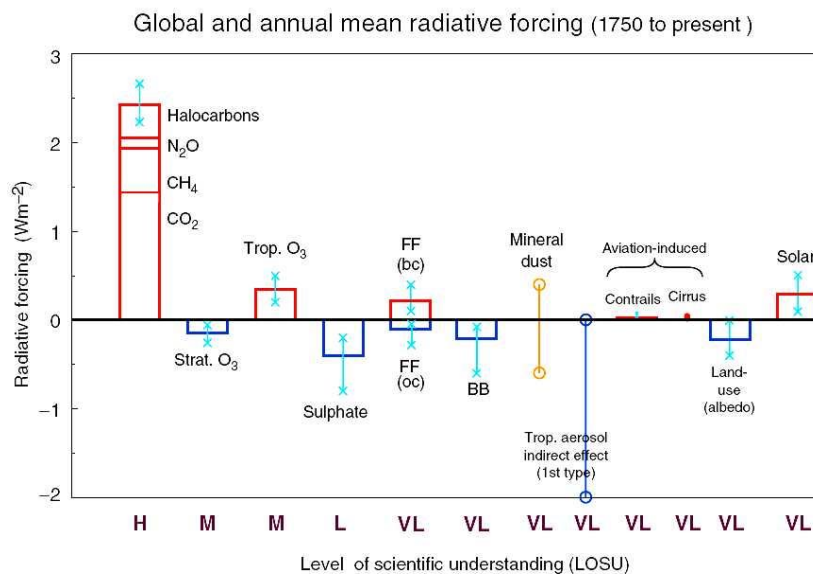
Allerede i år 61 skrev Seneca om mados og røg, der fyldte luften i Roms gader, og også Anden Mosebog fra år 1000 f.Kr. indeholder referencer til ”støvskyer af sod, der dækker hele Ægypten” (Fenger, 1997).

I nyere tid er der gennem det sidste århundrede dokumenteret flere store smogepisoder i storbyer, der har ledt til massedødsfald, f.eks. i Belgien 1930; 63 døde, Pennsylvania 1948; 20 døde, og den velkendte London smog i 1950, hvor ca. 4000 mennesker omkom (Oke, 1987; Donaldson et al., 2001), hvilket førte til ændringer i lovgivningen om luftforurening. De fleste dødsfald skete blandt de mest udsatte befolkningsgrupper; børn, ældre og syge. Især personer, der led af hjerte- eller lungesygdomme, omkom under smogepisoderne. København har dog ikke samme grad af luftforurening i sin fortid som f.eks. London, dels pga. at det var en væsentlig mindre by, men også pga. mere gunstige vejrforhold. Danmarks Miljøundersøgelser (DMU) har udviklet modeller, der anslår værdier for luftforureningen i København i 1850. Disse viser et niveau i kulbrinte og partikelforurening på ca. 10 gange det nuværende, hvilket kun var det halve af forureningen i London på samme tid (Fenger, 1997).

Når det gælder vurderinger af luftforureningen for hundrede år siden, anvendes indirekte metoder som viden om brændselsforbrug, befolkningstal, analyse af nedbrudte statuer osv. Det var først i slutningen af 1960'erne, at der blev påbegyndt systematiske målinger af luftforureningen i Danmark, hvilket i 1980'erne blev udvidet gennem det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP). Dette er et samarbejde mellem Miljøstyrelsen, DMU og relevante kommuner og amter. En af de længste tidsserier er målinger af svovldioxid i København, hvilket er faldet støt siden 1960'erne. Dette skyldes en ændring i lovgivningen, der medførte krav om mindre svovl i brændsler og en ændring i opvarmningen til fjernvarme, hvor anlæg med høje skorstene fører forureningen ud af

byen. Partikelforureningen har fulgt denne udvikling, dog med en mindre stigning i 1980'erne muligvis pga. øget kulforbrug (Fenger, 1997).

Gennem de seneste årtier er global opvarmning blevet et emne alle kender til og de fleste bekymrer sig om. Allerede i 1861 viste den engelske forsker Tyndall, at ændringer i atmosfærens indhold af CO_2 kunne give klimaændringer (Fenger, 1997). Det er nu blevet anerkendt af Det Internationale Panel for Klimaforandringer, IPCC, at de stigende globale gennemsnitstemperaturer *er* påvirket af menneskets aktiviteter og ikke er et naturligt udsving (IPCC, 2001, 3). Der diskuteres udslip af drivhusgasser på klimakonferencer verden over, og behovet for viden om gassernes opførsel i atmosfæren er øget.



Figur 1.1 Påvirkning af strålingsbalancen fra forskellige stoffer i atmosfæren, med usikkerheden angivet som lodrette linier. Niveaulet for videnskabelig forståelse af de enkelte stoffers virkning på strålingsbalancen er angivet i intervallet fra H=High til VL=Very Low (IPCC, 2001)

De vigtigste drivhusgasser, hvis øget emission er menneskepåvirket, er kuldioxid (CO_2), methan (CH_4), lattergas (N_2O), og ozon (O_2), hvoraf CO_2 påvirker strålingsbalancen kraftigst (se figur 1.1). Siden 1750 er CO_2 niveauet i atmosfæren steget med 33%, primært pga. det øgede forbrug af fossile brændstoffer, men også en ændret arealanvendelse har bidraget til stigningen (IPCC, 2001, 3).

Den vigtigste parameter der påvirker strålingsbalancen i modsat retning af drivhusgasserne er aerosollerne (partikler i luften). Partiklerne udøver en negativ påvirkning af strålingsbalancen via spredning og reflektering af solindstrålingen, og gennem ændring af skydannelse og skyegenskaber (IPCC 2001, 5). IPCC angiver, at partiklernes bidrag til den globale opvarmning, er af samme størrelsesorden som CO_2 , men med modsat fortegn (IPCC, 2001, 5). Der er dog stor usikkerhed på denne parameter (figur 1.1), og det er derfor nødvendigt at øge forskningen indenfor dette område. Ift. påvirkningen af strålingsbalancen er det de mindste partikler, der har den største effekt. Partikler af størrelsesintervallet $0.1\text{-}1\mu\text{m}$ i diameter kan hydrere til en størrelse på $1\text{-}2\mu\text{m}$, hvilket er den mest effektive partikelstørrelse til spredning af lys (pr. vægtmasse). De har også den

længste levetid i atmosfæren, da de større partikler fjernes via adhæsion til overflader eller udfældning, og da de vil koagulere langsommere (IPCC, 2001, 5).

En øget koncentration af partikler i luften vil, som nævnt, ikke kun generere forandringer af strålingsbalancen og dermed klimaet, men også udgøre en helbredsrisiko for befolkningen i byområder. Indenfor de seneste år er forskningen indenfor partikelkoncentrationer i atmosfæren øget væsentligt (Dorsey et al., 2002). Det nye fokus skyldes primært den nye viden indenfor lægevidenskaben vedrørende helbredseffekterne ved indånding af luft med høje partikelkoncentrationer. Den seneste forskning tyder på at det igen er de mindste partikler, de ultrafine (0.001-0.1µm), der er mest sundhedsskadelige (Donaldson et al., 2001; Dockery et al., 2001, Schwatz et al. 1999; Dorsey et al., 2002), men målemetoder og lovgivning er stadig fokuseret på de større partikler.

I dag er lovgivningen for partikelforurening i de fleste lande baseret på målinger af vægskoncentrationer. Den nuværende EU lovgivning er f.eks. på 50 µg/cm³ for PM₁₀ (partikler større end 10µm i diameter), men den forventes at blive revideret i 2010 på baggrund af den nye viden om sundhedsrisici og partikelstørrelsesfordelinger (Dorsey et al., 2002; www.dmu.dk,1). De groveste partikler vil nemlig udgøre den største andel af målingen ift. massen af suspenderet materiale, hvor de ultrafine vil dominere ved målinger af partikelantal (www.miljoe.kk.dk). For at få et klarere billede af mængden af de sundhedsskadelige ultrafine partikler er det derfor nødvendigt at måle partikelantal i stedet for den i dag dominerende målemetode af vægskoncentrationer (Viuf og Sjøgaard, 2004).

For at karakterisere partikelniveauet i byområderne er det ikke kun nødvendigt at foretage koncentrationsmålinger, men også målinger af partikelflux, for at kunne bestemme, hvor mange af disse partikler der forlader byrummet. Denne flux er ikke kun bestemmende for luftkvaliteten i selve byen, men angiver også et niveau for den potentielle eksport af forurening til de omgivende regioner (Dorsey et al., 2002).

Selvom der er foretaget fluxmålinger i årevis, og teknikken nu er meget udviklet, er der stadig en del komplikationer ved målinger i heterogene områder, som f.eks. byer.

Især CO₂ fluxe er blevet målt i mange år og i mange forskellige miljøer (Soegaard and Moeller-Jensen, 2003; Cropley et al., 2002), også i byområder. CO₂ fluxen kan ses som et direkte udtryk for den antropogene aktivitet, især trafikken, der bidrager med ca. 95% af CO₂emissionerne i byområder. Der bør derfor ses en klar kobling mellem trafik og CO₂ flux. Da partikelfluxen ligeledes har trafikken som primær kilde i byområder, bør de to parametre udvise samme variation.

Hvis der skal foretages politiske tiltag til at forbedre luftkvaliteten, er det nødvendigt først at have en viden omkring, hvilke faktorer der indvirker på forureningsniveauet. Denne viden opnås gennem forskning vha. målinger og modellering af luftforureningen.

Målingerne benyttes til en række anvendelser som f.eks. for at bestemme kilder og dræn i bymiljøer, og til validering og forbedring af modeller, der vurderer luftforureningen på

større tids- og rum skala end det er praktisk muligt at måle. Da byområder er meget heterogene, er emissioner herfra også meget svære at modellere, og direkte målinger af fluxe i disse områder er derfor meget vigtige.

DMU har udviklet adskillige luftforurenings modeller på flere skalaer, fra modellering af gaderummet (OSPM modellen) til modeller, der dækker hele Europa (DEM modellen). DMU har desuden udviklet THOR modellen der anvendes til at producere 3-døgns forudsigelser, som bl.a. benyttes ved "luft-udsigter" på DMI's hjemmeside, tests af scenarier for reduktion /forøgelse af emissioner (Brandt et al. 2003), og nationale varslingsystemer.

DMU foretager i dag målinger af forureningsniveauer og meteorologi fra 2 faste sæt af observationsstationer i København. Hvert sæt inkluderer en station i tagniveau og en i gadeniveau. Placeringerne er på taget af H.C. Ørstedes Instituttet (HCØ) og i krydset mellem Jagtvej og Tagensvej, og på et tag ved Jarmers Plads og nede på H. C. Andersens Boulevard.

Ingen af målestationerne har målinger, der kan anvendes til at beregne fluxen af partikler, og den er ikke tidligere målt i København. Gæsteforsker ved RISØ, Sara Pryor har, som eneste anden partikelfluxmåling i Danmark, foretaget målinger over skov, hvorfra resultater endnu ikke er udgivet (Pryor et al., *in press*). Partikelfluxer er dog med succes blevet målt i Edinburgh af J.R. Dorsey et al. (2001) og i Stockholm af E. M. Mårtensson et al. (2003), hvilket har givet interesse for at udvide mængden af data og foretage yderligere forsøg i andre storbyer, samt inspireret til dette projekt. Målingerne er alle foretaget med et system der består af et sonisk anemometer og en partikeltæller, samt instrumenter til supplerende meteorologiske målinger.

For at få erfaring med partikeltælling, samt for at konstatere om det er muligt at relatere partikel og CO₂ målinger, er der foretaget pilotforsøg med en partikeltæller og en CO₂ gasanalysator fra taget af Geografisk Institut i København.

Disse indledende forsøg afslørede hyppige sammenfald af svingningen i partikelkoncentration og CO₂ koncentration. Dette indikerer at de, som antaget, må have samme kilde, formodentlig trafikken (der vil ikke blive præsenteret data fra de indledende forsøg i dette projekt). For at udvide forsøget til at kunne måle døgnet rundt i en længerevarende periode, var det nødvendigt at finde en anden lokalitet. Denne skal opfylde de mest basale praktiske krav, som at det soniske anemometer skal monteres i en mast, og den tilkoblede partikeltæller skal kunne placeres nær ved, i et kontrolleret og beskyttet miljø. For at opfylde disse betingelser blev DMU's målestation på taget af HCØ valgt. Dette er ikke en optimal lokalitet, da turbulensen antageligt vil være påvirket af taget, men det var ikke muligt at udpege en anden lokalitet, der kunne opfylde kravene omkring instrumenteringen. Det er dog et typisk problem, at lokaliteten ikke er optimal ved meteorologiske målinger i byområder (Roth 2000).

I dette forsøg med partikelfluxmålinger, foretages samtidige målinger af CO₂ fluxe, til sammenligning med partikelfluxene og af temperaturen. Der er desuden anvendt supplerende meteorologisk data fra DMU.

1.2 Problemformulering

I dette speciale ønskes det undersøgt, hvorvidt det er muligt at bestemme partikelfluxe fra et byområde i det centrale København med eddykorrelations metoden og den anvendte instrumentering, opstilling og lokalitet.

For at belyse resultaterne af fluxmålingerne vil følgende forhold blive undersøgt:

- Det ønskes klarlagt, hvilke faktorer der påvirker målingerne i forhold til instrumenteringen og opstillingen.
 - Det forventes, at der vil være forstyrrelser af målingerne pga. mastens placering på et tag, da turbulensen kan være påvirket af bygningen. Det ønskes derfor belyst, om denne placering forstyrrer målingerne.
 - Det forventes, at der vil være et tab af flux i systemet. Det ønskes klarlagt hvilke parametre der påvirker dette tab.
- Trafikken har en klar variation gennem døgnet og ugen, og da den er hovedkilde til partikel- og CO₂ fluxe, forventes det, at fluxene følger denne variation. Det ønskes undersøgt om dette er tilfældet for data fra indeværende forsøg. Desuden ønskes det belyst om CO₂ og partikelfluxene kan relateres til hinanden.
- Da målestationen er placeret på en hævet lokalitet vil resulterende fluxe herfra stamme fra mange forskellige områder opvinds for lokaliteten. Dette ønskes belyst ved analyse af forholdet mellem fluxene og vindretningen.



Figur 1.2 Politiken d. 17/4-2004. "De ultrafine partikler fra osende biler og lastbiler er suverænt de farligste for helbredet. Alligevel gør vi intet for at måle omfanget af dem. Og heller intet for at komme dem til livs. Det er dybt uheldigt". Af Bjørn Lomborg og Thommy Larsen, Institut for Miljøvurdering.

2. Teori

For at kunne anvende eddykorrelationsmetoden til bestemmelse af partikelflux i et byområde, er det relevant først at se på hvilke parametre der påvirker transporten i atmosfæren, nemlig turbulensen. Derudover har jeg valgt at se på, hvilke klimatologiske forhold, der adskiller byområder fra andre overflader, samt hvilke parametre der påvirker forureningsniveauet i byrummet.

Det er desuden anvendeligt at etablere en grundviden om selve eddykorrelationsmetoden samt om partikler og måling af disse. Der vil ikke blive gennemgået teori om CO₂ målinger, da disse blot er foretaget som en indikator for antropogen aktivitet, og for at have en parameter med samme hovedkilde som partiklerne, til sammenligning.

2.1 Turbulens

Turbulens dannes ved en kombination af mekanisk og termisk effekt af atmosfærens møde med jordens overflade. Solopvarmningen af overfladen vil danne termale hvirvler, og vindens møde med ruhedselementer på overfladen vil resultere i mekanisk dannet turbulens.

De største hvirvler, der kan genereres i overfladelaget, er af samme størrelsesorden som lagets vertikale udstrækning, som typisk varierer mellem 100-3000m (Stull, 1988, kap.1). Det er i dette lag at overfladen påvirker turbulensen, og i dette lag vi lever, påvirkes af, og måler turbulens og vind.

Vinden, som vi oplever den, beskrives ofte ved en middelvind og en fluktuerende del.

Turbulensen kan beskrives ved denne fluktuerende del (Panofsky og Dutton, 1984, kap.1).

I atmosfærens nederste lag vil middelvinden stige med højden over overfladen, ligesom hvirvlernes størrelse vil øges. Hvirvlerne nedbrydes gradvist til mindre og mindre hvirvler, hvorefter de sidst dissiperes til varme. Som hvirvlernes størrelse mindskes, vil også energien mindskes, da det er de største hvirvler, der indeholder mest energi. Denne nedbrydning af hvirvler udviser en karakteristisk kaskade fra energiproduktion til energidissipation, som ses i en spektral analyse af vindmålinger. Dette spektrale mønster blev først undersøgt af Kolmogorov i 1940'erne, og senere videre udviklet vha. målinger af bla. Kaimal og Wyngaard, hvis eksperimenter i Kansas i begyndelsen af 1970'erne stadig danner grundlag for mange spektralanalyser af turbulensen i overfladelaget (Kaimal et al., 1972; Panofsky og Dutton, 1984, kap.1).

Et andet banebrydende bidrag til turbulensteori blev fremsat i 1938 af Taylor; Den fastfrosne bølge hypotese. Med teorien om at turbulens, og dermed hvirvlens form, kan antages at være frossen, som hvirvlerne advekterer forbi en sensor, blev det muligt at anvende punktmålinger af vindhastigheder, til at udlede rumlige antagelser omkring hvirvlerne. Hvis hvirvlerne udvikler sig med en tidsskala, længere end det tager dem at passere sensoren, kan

vindmålingerne som en funktion af tiden, dermed resultere i en antagelse om den rumlige udbredelse af hvirvlen. Hypotesen kræver derfor at vindhastigheden, hvormed hvirvlen transporteres forbi sensoren, er forholdsvis høj relateret til turbulensen. For at opfylde dette kan standardafvigelsen på middelvinden anvendes, der anbefales at være mindre end det halve af middelvinden, for at teorien er gældende (Stull, 1988, kap.1).

2.1.1 Turbulensintensiteten

For at angive et mål for produktionsraten af turbulens kan turbulensintensiteten, I_i benyttes, hvilket er spredningen på den horisontale, laterale eller vertikale vindkomponent, σ , normaliseret med den resulterende horisontale vindhastighed, U (Stull 1988, kap. 2; Roth 2000);

$$I_i = \frac{\sigma_i}{U} \quad (2.1)$$

$i = u, v, w$

Turbulensintensiteten afhænger af målehigheden, overfladens ruhed og stabiliteten. Grundet øget ruhed og lavere vindhastigheder i byområder, vil turbulensintensiteten over by i en given målehighde, generelt være op mod dobbelt så høj som over landområder (Roth, 2000). Roth (2000) har desuden vist, at turbulensintensiteten vil stige med øget instabilitet.

2.1.2 Similaritetsteori

Teoriene om turbulensen i overfladelaget er ikke udtømmende, men på trods af at der ikke er en total forståelse for, hvorfor turbulens udarter sig som den gør, er der observeret systematiske ensartet karakteristika ved turbulensen. Det er derfor antageligt at der kan udarbejdes empiriske teorier.

Similaritetsteori er netop dette- Teorier baseret på, at variable kan grupperes i dimensionsløse grupper, således at der kan udledes empiriske relationer mellem dem, der er universelle (Stull 1988, kap. 9).

2.1.2.1 Monin- Obukhov længde

I 1954 fremsatte Monin og Obukhov en teori for håndteringen af forholdet mellem mekanisk og konvektiv turbulens (Panofsky og Dutton, 1984, kap.1), som stadig er førende indenfor grundlæggende studier af turbulensen i overfladelaget.

I denne teori indgår definitionen af friktionshastigheden, u_* , og Monin-Obukhov længden L . Begge antages at være konstante med highden indenfor overfladelaget. L varierer kun af den sensible varmefflux Q_H og friktionshastigheden, u_* .

L vil være numerisk lille og negativ når termisk turbulens dominerer, og den nærmer sig uendelig når mekanisk turbulens dominerer. Om natten, ved stabil atmosfære, svage vinde og nedadrettet varmekraft opnår L dermed små positive værdier.

Monin-Obukhov længden L (Stull, 1988, kap.5) ;

$$L = - \frac{u_*^3 c_p \rho T}{k_a g Q_H} \quad (2.2)$$

Det er almindeligt anvendt at betragte L ved at se på forholdet mellem målehighden, z (eventuelt fratrukket en nulplansforskydning, d) og Monin Obukhov længden (Dorsey et al., 2002; Panofsky og Dutton, 1984, kap. 6). Dette forhold anvendes ofte til beregning af stabilitetsfaktorer.

$$\xi = \frac{z - d}{L} \quad (2.3)$$

2.1.2.2 Det logaritmiske vindprofil

En anden anvendelse af similaritetsteori er antagelsen om det logaritmiske vindprofil- at vindens hastighed vil stige logaritmisk med highden over overfladen, og dette forhold vil være universelt.

Nær overfladen vil vindhastigheden være nær 0 pga. ruheden, mens trykgradienter vil føre til højere vindhastigheder med afstanden fra overfladen indtil toppen af overfladelaget. Herefter vil vindprofilet være konstant indtil opblandingszonen (eng. entrainment).

For neutrale forhold vil profilet være tættest på logaritmisk, ved stabile bøjje lettere nedad og ved ustabile forhold vil vindhastighedsprofilet bøjje opad (Oke, 1987, kap. 2; Stull 1988, kap. 9).

Formel for det logaritmiske vindprofil;

$$U = \frac{u_*}{k} \ln \left(\frac{z - d}{z_0} \right) \quad (2.4)$$

k: Von Karman konstant (ofte sat til 0.4.)

u*: friktionshastigheden

z₀: ruhedslængden

d : forskydningshighden

Hvor friktionshastigheden kan beregnes ud fra følgende formel, når koordinatsystemet er roteret således at x-aksen ligger i u-komponentens retning:

$$u^* = \sqrt{|u'w'|} \quad (2.5)$$

Over heterogene overflader kan det logaritmiske vindprofil dog ikke antages at være gældende, da u^* vil variere med højden, og antagelser bag det logaritmiske vindprofil vil falde bort.

Z_0 , ruhedslængden afhænger af højden af overfladeelementerne, deres form og deres relative placering (Panofsky og Dutton, 1984, 6). Denne kan være meget svær at måle over et byområde (Oke 1987, kap. 8), hvor overfladen er meget heterogen.

Typiske ruhedslængder over skov og by ligger mellem 1 og 5 m (Panofsky og Dutton, 1984, 6). Oke (1987, kap. 8) angiver Z_0 til 1.5 til 2.5m for byer med under 5 etages bygninger, som størstedelen af København, og op til 10m for byer med højhuse.

Når der måles over en overflade med høje tætte ruhedselementer som f.eks. træer og bygninger, vil målehøjden over overfladen typisk forskydes med 70-80 % af højden af ruhedselementerne, da sensoren "ser" en anden overflade end den faktiske (Panofsky og Dutton 1984, kap. 6). I disse tilfælde skal målehøjden reguleres med denne højde, kaldet forskydningshøjden (d).

2.2 Spektralanalyse

Similaritetsteori er også anvendt på spektralanalyse, hvor det antages at et område af spektret udviser en ensartet form ud fra teorien omkring hvirvlernes dannelse og nedbrydning.

En data-sekvens kan indeles i en række af sinus og cosinus funktioner. Der vil derfor kun kunne afbildes hvirvler med en frekvens på det halve af opsamlingsfrekvensen, da der skal to punkter per periode til at beskrive en bølge. Denne frekvens er også kaldet Nyquist frekvensen (Stull, 1988, kap. 8).

Spektrene er anvendelige i analysen af meteorologiske data, da de beskriver, hvordan variansen af en størrelse er fordelt over forskellige frekvenser, og dermed hvordan energien er fordelt over de forskellige størrelser af hvirvler (Panofsky og Dutton, 1984, kap. 8; Stull, 1988, kap. 9). Dette giver et billede af f.eks. turbulensen under målingen.

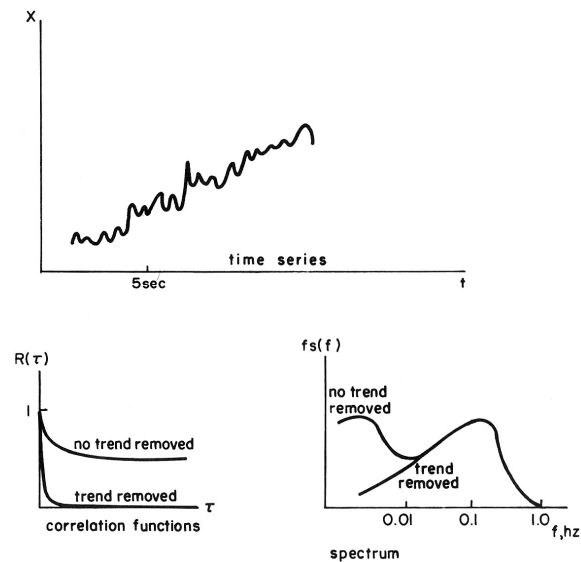
For store datamængder er Fast-Fourier-Transformation (FFT) en hurtig og let metode til at estimere spektrale densiteter (Panofsky og Dutton, 1984, kap. 8). I powerspektre ud fra FFT analyse angives spektrene som frekvensen gange kvadratet på den parameter der ønskes spektra for:

$$fS(f) = C^2 f_c \quad (2.6)$$

Hvor C er den ønskede parameter, f.eks. den resulterende horisontale vind.

FFT analysen køres på en periode af data, typisk svarende til 2^x målinger, hvor x er et heltal. Jo længere en periode, jo større sikkerhed er der, for at de største termale hvirvles bidrag til fluxen registreres. Hvis kurven har et toppunkt og falder mod de lavere frekvenser, er de største hvirvlers bidrag til fluxen repræsenteret i spektret.

En for lang periode kan medføre risiko for trend eller instationaritet i perioden, hvilket vil resultere i en opadrettet kurve ved de høje frekvenser. Dette skyldes at trenden tilfører en "falsk" varians med høj frekvens (figur 2.1).



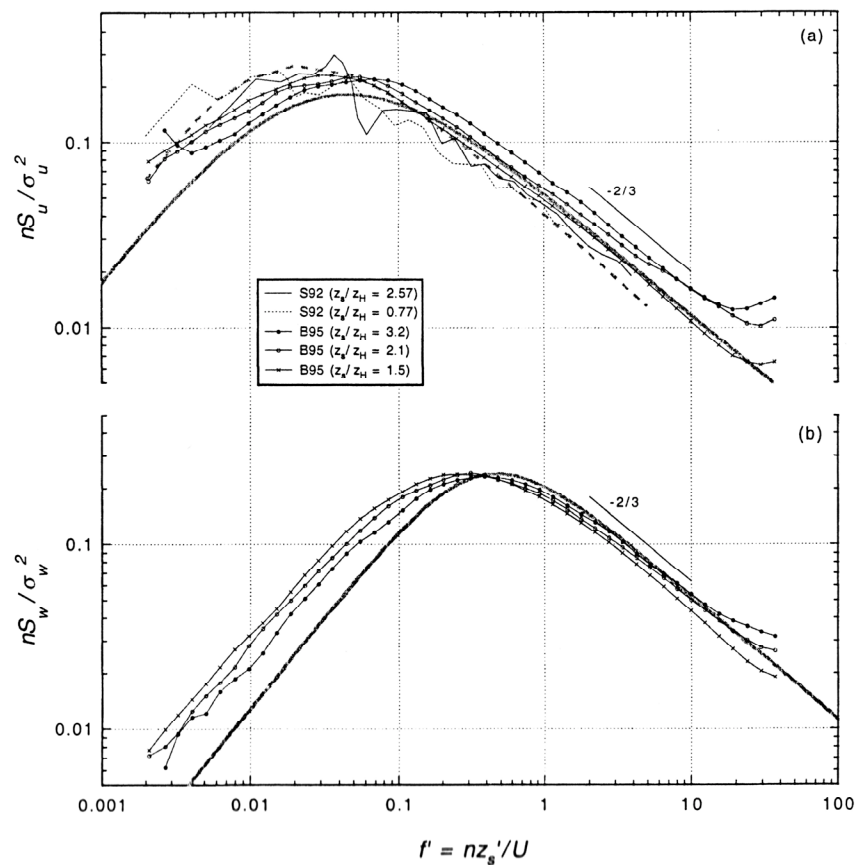
Figur 2.1 Trend i datasekvens, og effekten i spektret (Panofsky og Dutton, 1984)

En anden "falsk" varians, der kan opstå i spektret er foldning, også kaldet "aliasing". Dette kan forekomme, hvis der opsamles data med en lavere frekvens end sensoren kan registrere og signalet, der måles, faktisk har en varians med en højere frekvens end der opsamles. Foldning ses som en top ved Nyquist frekvensen (Stull 1988, kap. 9) eller blot som en stigning i spektret ved de højeste frekvenser (Roth, 2000).

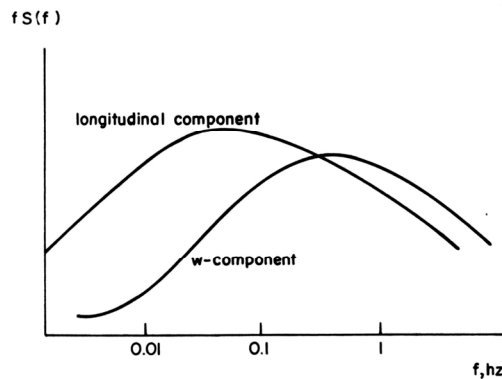
Figur 2.2 viser et eksempel på et log-log plot af normaliserede spektre fra forskellige målehøjder fra Roth (2000). Her ses aliasing ved frekvenser over 8 s^{-1} . Spektret er mere irregulært ved de lave frekvenser, da punkterne her er baseret på langt færre data end i de højfrekvente. Dette vil være mere udtalt jo kortere en periode, og jo lavere opsamlingsfrekvens der beregnes på. Det ses desuden i figur 2.2, at toppen af spektret for den vertikale vindkomponent w (nederst) er rykket mod højere frekvenser, end toppen af spektret for den horisontale komponent U (øverst). Forskellen mellem de to spektre skyldes, at hvirvlerne, der bidrager med den største energi, er større i horisontal retning end i vertikal (en

udledning, der kræver, at Taylors hypotese er gældende). Dette ses også i skitsen i figur 2.3 fra Panofsky og Dutton (1984).

Toppen af spektret for både U og w vil generelt rykke mod lavere frekvenser jo højere der måles, og mod højere frekvenser jo højere vindhastigheden er (Panofsky og Dutton, 1984, kap. 8). Dette skyldes, at ved høje vindhastigheder vil der dannes relativt flere små højfrekvente hvirvler, og en større del af energien vil dermed stamme fra disse. Ud mod de lave frekvenser vil forholdet mellem w og U spektret blive mindre og mindre, da jo større hvirvlerne er, jo mere flade er de.



Figur 2.2 Normaliserede spektre fra målekampagner under neutrale atmosfæriske forhold. Spektrene er for den horisontale vindkomponent U (øverst) og den vertikale vindkomponent w (nederst). Kurverne viser spektre fra forskellige målehøjder. Den teoretiske hældning på $-2/3$ i inerti området følges, og der ses aliasing ved $f > 8$. Det ses desuden, at kurven er mere irregulær ved de lave frekvenser pga. færre datapunkter her end i de højfrekvente. Den fuldt optrukne linie er spektre beregnet ud fra Kaimal's ligninger (Roth, 2000).



Figur 2.3 Skitse af spektre for den resulterende horisontale vindkomponent U og den vertikale vindkomponent w . Spektret for U rykker mod lavere frekvenser end w , og toppen ligger højere (Panofsky og Dutton, 1984, kap. 8)

Spektre kan inddeles i 3 områder efter teori af Kolmogorov; Energi-området (eng. subrange), inerti-området og dissipationsområdet (Panofsky og Dutton, 1984, kap 8; Roth 2000).

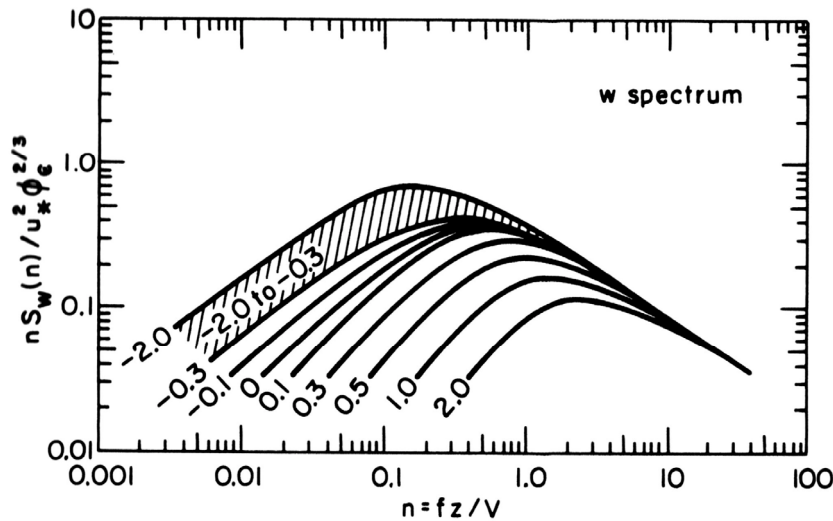
Energiområdet repræsenterer de største hvirvler med lægdeskalaer på 10 meter til adskillige kilometer, og tidsskalaer på 10 sekunder til 10 minutter. Denne del af spektret er karakteriseret ved parametre som middelvinden, ruheden og grænselagsdybden.

Inerti-området består af bølgelængder mindre end målehighjden. Hvirvler i denne del af spektret stammer fra nedbrydelsen af de større hvirvler, og der introduceres hermed ikke ny energi i denne del af spektret.

I dissipationsområdet af spektret omdannes energien til varme med dissipationsraten, hvormed turbulensen forsvinder.

Da inertiområdets form udelukkende afhænger af nedbrydelsen af hvirvlerne, kan der fremstilles similaritetsteorier for formen af spektret i dette område. En af disse er Kolmogorovs teori om at kurven skal følge $-2/3$ hældning indenfor inertiområdet, hvilket ofte anvendes som indikator for målingernes kvalitet (se figur 2.2) (Stull, 1988, kap.9; Roth, 2000).

Der er udledt en række ligninger for spektrenes udformning ud fra eksperimenter fra Kansas, foretaget af Kaimal et al. i (1972) (Panofsky og Dutton, 1984). Spektrene er målt over en optimal overflade med lav ruhed, og homogen i lang afstand fra målestationen i alle retninger. Figur 2.4 viser et eksempel på Kaimal spektre for den vertikale vindhastighed ved forskellige stabilitetsforhold angivet som z/L .



Figur 2.4 Normaliseret w spektre fra Kaimal et al. 1972 (Panofsky og Dutton, 1984, kap. 8). X akse er normaliseret med vindhastighed. Tallene ved kurverne viser stabilitetsfaktoren z/L . Jo mere ustabil atmosfære, jo mere energi og jo større en del af energien stammer fra lavfrekvent turbulens.

Spektrene følger $-2/3$ hældningen i inerti området, og det ses, at jo mere ustabil atmosfæren er, jo højere ligger toppen, og jo længere rykker den mod de lavfrekvente dele af spektret. Dette skyldes, at stabile forhold hæmmer de store termale hvirvler og dermed den lavfrekvente turbulens.

Hvis der måles over et område hvor turbulensen domineres af længeskalaen af ruhedselementerne snarere end målehøjden, hvilket kan forventes, hvis der måles i slipstrømslaget (slipstrømslaget uddybes i afsnit 2.3) over en by, kan der ligeledes ses et skift af toppen af spektret mod lavere frekvenser (Roth, 2000).

2.3 Byklima

Byområder er karakteriseret ved en række parametre, der påvirker det lokale klima og ændrer det i forhold til andre områder. Ændringerne sker primært gennem forandringer i energibalancen og turbulensen. De vigtigste elementer der adskiller byen fra andre overflader, er den øgede ruhed og varmeø-effekten (eng. Urban heat island) (Roth 2000)

Strålingsbalancen i byen påvirkes især af overfladens høje albedo, samt af bygningerne. De mange bygninger medfører en reduktion i udgående langbølget stråling, øget tilførsel af langbølget stråling fra antropogen opvarmning, og høj opmagasinerung af varme i nattetimerne. Også vandbalancen påvirkes pga. den impermeable overflade, og de ændrede fordampningsforhold (Oke, 1987, kap. 8). Disse faktorer er årsag til at byen generelt er varmere end de omkringliggende områder, hvilket kaldes varmø-effekten.

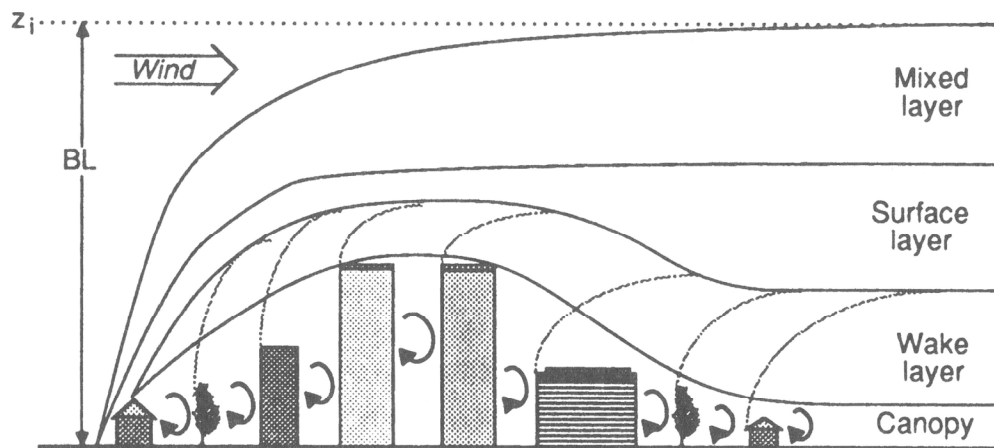
Varmeø-effekten er med til at bevare et konvektivt blandingslag over byen, selv i nattetimerne, hvor temperaturforskellen mellem byen og de omkringliggende områder er størst. I dagtimerne kan denne øgede varme fra byen medføre et højere blandingslag over byen, end over de omkringliggende områder (Roth, 2000). Også de høje bygninger og den øgede turbulens og drag pga. øget ruhed medfører ændrede karakteristika for byens grænselag, f.eks. en lavere middelvindhastighed end over de omkringliggende områder i dagtimerne (Oke 1987, kap. 8; Stull 1988, kap.14). De lange lige vej mønstre kan dog også accelerere vindhastigheden, når vinden blæser parallelt med vej mønstret, og dermed medføre lokale områder i gadeniveau med ”vindtunneller” (Oke, 1987, kap. 8).

Pga. varmeø-effekten og den øgede mekaniske turbulens, er atmosfæren over byen sjældent stabil (Roth, 2000). Selv i nattetimerne bevares et såkaldt blandingslag over byen, og bevirker at døgnvariationen i stabilitetsforholdene ikke er så udtalt som i landområder. Dette medvirker til at vindhastighederne i nattetimerne heller ikke falder så kraftigt i byen, som på landet (Oke, 1987, kap. 8).

Den øgede termale og mekaniske turbulens over byen er med til at danne et indre blandingslag for byen, hvis karakteristika er påvirket af byens overflade (Oke, 1987, kap.8; Stull, 1988, kap.14; Rotach, 1999). Dette grænselag kan inddeles i en række mindre lag, hvilket der er lavet utallige versioner af. Figur 2.5 viser en udgave af en inddeling; Canopylaget (Eng. Urban Canopy Layer, UCL) fra jorden og op til bygningstagene, ”slipstrøms”laget, eller ”det indre ruhedslag” (Eng. Roughness Sub-layer, RSL eller ”wake”) hvor turbulensen nedstrøms for bygningerne dominerer, overfladelaget hvor de enkelte bygninger ikke længere ses, men der i stedet er en middel-påvirkning af byen, og sidst byens blandingslag (Eng. Mixing Layer, ML) hvor hele byen stadig påvirker atmosfæren (Stull, 1988, kap. 14; Roth, 2000).

Byens grænselag kan være fra hundrede meter skala til flere kilometer, og vokse sig så højt at det strækker sig gennem hele den indre grænselag/ blandingslag (Oke, 1987, kap. 8).

Højden af blandingslaget måles meget sjældent, på trods af at det er en væsentlig faktor for byens klima, og især for niveauet af forurenende stoffer. Der findes en række modeller for beregningen af blandingslagets højde over landområder, men over byområder, er højden stadig meget dårligt beskrevet. Byens blandingslag er sværere at bestemme end over landområder, fordi det er mere horisontalt inhomogent og karakteriseret af den øgede opblanding, forårsaget af varmeø-effekten og den høje overfladeruheid (Baklanov, 2001; Gryning, 2005).

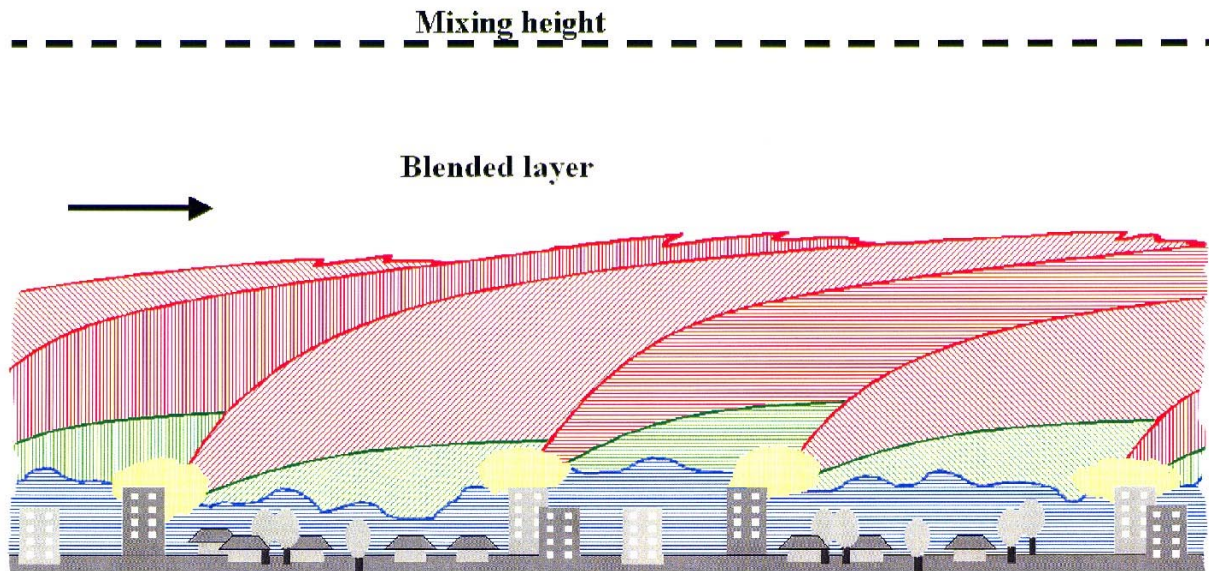


Figur 2.5 Lagene i atmosfæren over byen (Stull, 1988).

Mange modeller for turbulens, udviklet over homogene områder, kan også anvendes tilfredsstillende over inhomogent terræn. Blandingslagets højde kræver dog et meget større homogent område for at indstilles på overfladen, end turbulensen, og det er derfor sværere at anvende modeller udviklet over homogene områder, over by (Gryning, 2005). Kun få modeller er udviklet specifikt til at bestemme højden over byen, så ofte vil der, trods ovenstående, anvendes andre modeller. Baklanov (2001) fandt at Gryning og Batchvarovas (1996) model udviklet over landområder kunne fungere tilfredsstillende over by.

For simple vurderinger af udviklingen af blandingslaget, kan der angives nogle parametre som højden af laget, er påvirket af, f.eks. vindhastigheden og stabiliteten. Roth (2000) angiver desuden følgende stationære parametre som bestemmende for den maksimale højde af RSL over byen; afstanden mellem bygningerne (D), bygningshøjden (z_h) og ruhedslængden (z_0). Typiske højder af RSL angives som 2.5-3 gange bygningernes højde (Rotach, 1999; Roth, 2000; Gryning og Bachvarova, 2005), da det er denne parameter der kan måles mest pålideligt, og derfor er lettest at beregne RSL ud fra.

Figur 2.5 er en meget simplificeret udgave af en bystruktur. Normale bystrukturer indeholder høje og lave bygninger imellem hinanden, hvilket komplicerer mønsteret. Figur 2.6 viser en udvidet illustration af lagene over byen (Batchvarova og Gryning, 2005). Her ses øverst grænselaget som er det lag der påvirkes af de konvektive processer fra overfladen i løbet af et døgn. Under dette er, med rødt, byens indre grænselag hvor hele bydele påvirker turbulensen. Med grønt vises overfladelaget, der er i ligevægt med et område af bygninger, og med blå vises ruhedslaget, der er stærkt inhomogent. De gule områder omkring høje bygninger symboliserer tilpasningszoner mellem områder. Denne figur viser tydeligt at det er meget svært at simplificere opdelingen af lagene over byen, og jo tættere på tagniveau jo mere kompliceret bliver det at vurdere i hvilket lag man måler.



Figur 2.6 Inddeling af lagene over en by. Rødt: byens indre grænselag. Grønt: Slipstrømslaget. Gul: tilpasningszoner omkring bygninger. Blå: ruhedslaget / canopylaget (Batevarova og Gryning, 2005)

Monin-Obukhov teori kan anvendes i overfladelaget, men ikke i overgangszoner eller i ruhedslaget. Hvis man vil være sikker på at kunne anvende denne teori på målinger over byen anbefales derfor en måleheight på 3-5 gange bygningsheighten (Gryning og Batchvarova, 2005).

2.3.1 Turbulens i byrummet

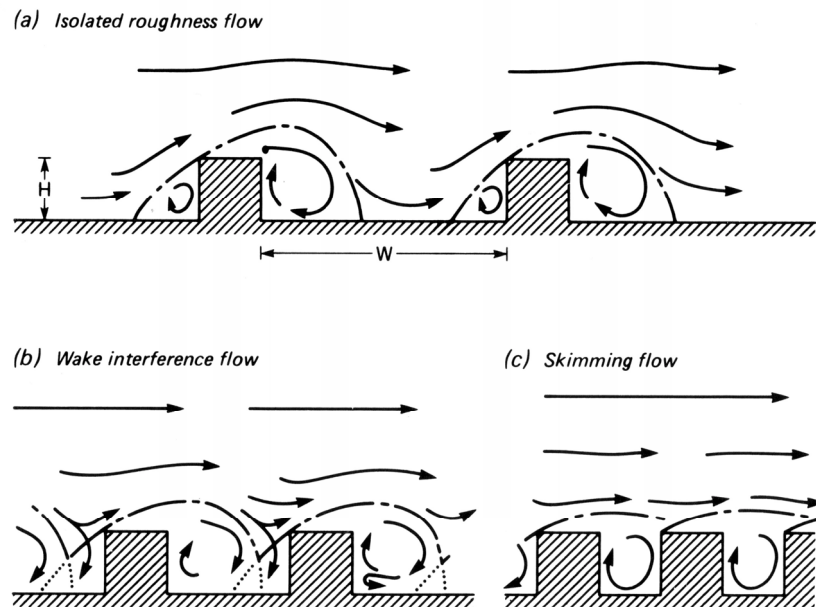
Mange af de forudsætninger der ligger bag etablerede turbulens betragtninger, er udarbejdet for homogene jævne overflader, og dermed ikke gældende over byens ru inhomogene overflade. Forhold som logaritmiske vindprofiler og similaritetsteori kan, som nævnt, derfor ikke forudsættes at være gældende (Roth 2000).

Da der i dette projekt måles i tagniveau, vil der ikke blive gennemgået teori for de mange turbulensmønstre der kan opstå i gadeplan.

Turbulensen i byrummet påvirkes af skiftende overfladetyper, bygninger, vejnet, og genereres på gadeplan også af trafikken.

Når vinden rammer bygningerne opstår et karakteristisk mønster. Vindstrømmen presses over og omkring bygningen, således at der dannes en opad rettet vind på luvsiden, og en hvirvel på læsiden. Dette skyldes et øget tryk på luvsiden, og et lavtryk på siderne, toppen og læsiden af bygningen, hvilket danner en cirkulationscelle (Oke, 1987, kap. 8) (se figur 2.7).

I et byområde vil bygningerne ofte ligge så tæt at strømmingen påvirkes af flere bygninger. For at bestemme hvor tæt bygningerne ligger i forhold til påvirkningen af strømmingen, anvendes ofte forholdet mellem bygningernes højde og afstanden mellem dem (Height/Width).



Figur 2.7 Flowregimer over bygningsstrukturer (Oke, 1987, 8)

Hvis H/W forholdet er mindre end 0.4 ligger bygningerne så spredt at strømmingen omkring én bygning ikke påvirker den næste. Er forholdet mellem 0.4 og 0.7 vil slipstrømmen fra den ene bygning påvirke strømmingen omkring den næste, og ved H/W forhold over 0.7 vil strømmingen skimme over bygningerne, og danne en læ-hvirvel mellem dem (Oke, 1987) (se figur 2.7).

Ifølge Raupach et al.. (1996) kan hvirvlerne i atmosfæren, over en canopy inddeles i 3 størrelser i forhold til længdeskalaen, L_S (i et bymiljø er L_S af samme størrelsesorden som bygningshøjden (Roth, 2000)). De største hvirvler er, som over andre overflader, på størrelse med det indre grænselags højde. Nær overfladen er de store i horisontal udstrækning men små i vertikal, og bidrager derfor ikke meget til vertikal transport (hvilket også kan ses i spektre). De næststørste hvirvler er af samme størrelsesorden som L_S , og de mindste hvirvler er af en størrelsesorden væsentligt mindre end L_S . Disse er skabt af slipstrøm omkring ruhedselementerne, og disperer primært energien (Raupach et al., 1996). Over et byområde er "canopien" mere åben, og teorien skal modificeres. Strømmingen over byen er tredimensionel, og en bestemmelse af længdeskalaen L_S bliver derfor mere kompliceret. Her er især slipstrøms-effekten vigtig for beskrivelse af hvirvlerne og turbulensen (Roth, 2000).

2.3.2 Spredning af forurening i byrummet

Der er to faktorer der påvirker forureningsniveauet i byen; størrelsen af emissionerne (og til dels også hastigheden hvormed de emitteres) og atmosfærens tilstand.

Emissionerne kan f.eks. frigives som røg fra høje skorstene, hvormed de føres væk fra byen, eller som udstødning fra trafikken i gadeniveau, hvorefter de transporteres og/eller omdannes indenfor byens grænselag, hvilket resulterer i to vidt forskellige situationer.

For partikel- og CO₂emissionerne til atmosfæren i et bymiljø, er variationen typisk cyklisk med døgnet og ugens gang, da de hovedsagligt svinger med variationen af deres hovedkilde; trafikken. Dermed er denne variation rimelig forudsigelig, og ensformig. Men hvordan og hvor meget disse emissioner spredes i atmosfæren, og dermed også hvor høje koncentrationer der findes i byrummet, er i høj grad afhængigt af vejret.

Det er især atmosfærens stabilitet samt vindens hastighed der afgør spredningen og transporten af emissionerne (Oke, 1987, kap. 9). Stærk instabilitet, højt blandingslag og høje vindhastigheder fører til den største spredning af emissionerne. Et lavt blandingslag, evt. pga. stabil atmosfære eller et inversionslag, kan derimod føre til ophobning af emissionerne.

Inversionslag kan opstå ved nedkøling nedefra, f.eks. på en sommerdag efter regn, eller ved opvarmning ovenfra, f.eks. ved nedsynkende luft fra en højtrykspassage (Oke, 1987, kap. 9).

Høje vindhastigheder vil medføre øget blandingslag. Jo højere vindhastighed, jo større friktion mellem luftlag og med ruhedselementerne, og dermed større turbulens og opblanding.

Hvirvlerne dannet ved denne turbulens er ofte små og spreder forureningen. Det er derfor de lave vindhastigheder der er de "farligste" i forbindelse med ophobningen af forurening.

De ovennævnte faktorer er alle bidragene til at de bedste forhold for dispersion opstår om dagen. Vindhastigheden er større om dagen, atmosfæren er mere ustabil, og blandingslaget er højere.

Forureningen i byer er typisk også mindre om sommeren end om vinteren, da der er større udslip fra varmeproduktion, biler med koldstart og pga. den mere stabile atmosfære der er hæmmende for dispersionen.

2.5 Eddykorrelation

En meget anvendt metode til direkte måling af vertikale fluxe er eddycovarians, også kaldet eddykorrelations metoden. Teorien er baseret på Navier-Stokes teori om bevægelse og Reynolds regler for midling (Foken & Wichura, 1996; Grelle, 1997).

Hvirvlerne i atmosfæren transporterer masse og energi. Den vertikale flux af en størrelse, f.eks. varmefluxen, bestemmes som produktet af middelværdierne og fluktuationerne omkring disse (Oke, 1987, app. 4);

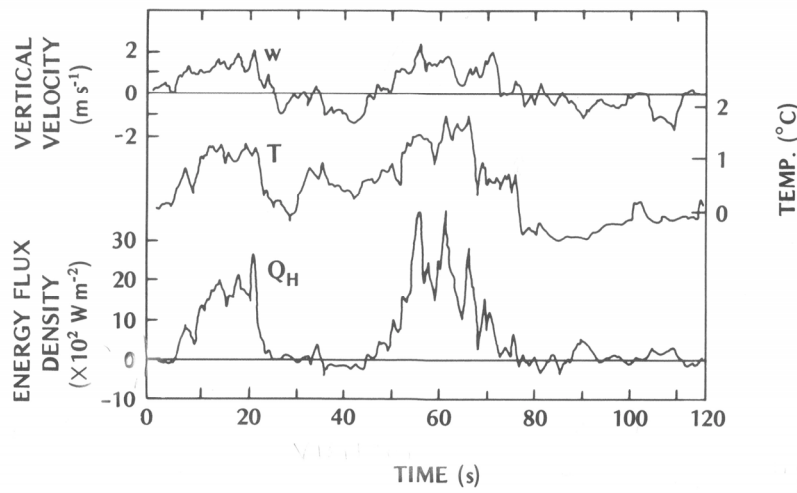
$$\overline{F} = \overline{(\rho + \rho') \cdot (w + w') \cdot (s + s')} = \overline{\rho \cdot w \cdot s} + \overline{\rho \cdot w \cdot s'} + \overline{\rho \cdot w' \cdot s} + \overline{\rho \cdot w' \cdot s'} + \overline{\rho' \cdot w \cdot s} + \overline{\rho' \cdot w \cdot s'} + \overline{\rho' \cdot w' \cdot s} + \overline{\rho' \cdot w' \cdot s'} \quad (2.7)$$

ρ : luftens densitet, w : vertikal hastighed, s : volumetrisk indhold.

Da definitionen lyder at midlet af fluktuationerne omkring middel er nul, kan led med en fluktuationsfaktor fjernes (Reynolds regler for midling, (Grelle, 1997; Lee, Massman & Law, 2004, kap. 2). Dermed kan led nr. 2, 3 og 5 slettes. Luftens densitets kan også antages at være konstant, således at led nr. 6, 7 og 8 slettes. Også midlet af alle fluktuationer omkring middel af den vertikale vind bliver nul, hvis målingerne foretages over fladt terræn. Dette sletter led nr. 1. Den vertikale vind kan ligeledes antages at give nul, da koordinatsystemet til senere databehandling liggendes med aksen i middelvindretningen. Dette kaldes det naturlige koordinatsystem, og er det mest anvendte (Massman og Lee, 2002, kap. 2; Finnegan et al., 2003). Fluktuationer i luftens densitet kan også sættes til nul, da denne forudsættes at være konstant i grænselaget (Oke, 1987). Hermed kan ovenstående ligning reduceres til følgende:

$$F = \overline{\rho s' w'} \quad (2.8)$$

En høj positiv flux (typisk angivelse af fluxe er, at opadrettede fluxe er positive) vil derfor have høje værdier i opadrettet vertikal vindhastighed, samtidig med høje koncentrationer af den målte parameter. Figur 2.5 viser et eksempel med målinger af temperatur og vertikal vind, hvor det ses at den resulterende varmefflux, Q_h , viser høje værdier når der forekommer korrelation mellem kraftige opad rettede vinde og høje temperaturer.



Figur 2.8 Fluktuationer i vertikal vind og temperatur, og den resulterende varmefflux (Oke, 1987, kap. 2)

Eddykorrelationsmetoden har en række forudsætninger (Oke, 1987; Foken & Wichura, 1996; Grelle, 1997; Lee, Massman & Law, 2004);

- Horisontal homogen overflade.
 - Nødvendig for at kunne ignorere horisontale fluxe.
- Ingen kilder eller dræn ml overflade og måleniveau.
- Fuldt udviklet turbulens.
 - Målingerne skal foretages indenfor det indre grænselag hvor strømmingen er turbulent og fluxen kan antages konstant med højden.
- Stationaritet.
 - Der kræves stationaritet i den måleperiode der midles over, hvilket indebærer at koncentrationerne skal ligge på et konstant niveau gennem perioden.
 - Stationaritet er et krav, da der forudsættes 0 opmagasinering i systemet. Uden dette er den simple eddykorrelationsformel ikke gyldig.

For at udlede en flux fra en enkelt punktmåling, forudsættes desuden Taylors hypotese for fastfrosne hvirvler (se afsnit 2.1).

Alle forudsætningerne er sjældent opfyldt (Pryor et al., in press). Især kravet om horisontal homogen overflade er svært at opfylde, og direkte umuligt ved bymålinger. Det forudsættes derfor at der måles så højt over byen, at området kan anses for at have en homogen netto flux (Nemitz et al., 2002, A).

Stationaritet er også et alvorligt problem for fluxmålinger (Foken & Wichura, 1996). Dette kan skyldes flere faktorer, som ændringer i emissionen af den målte parameter, ændringer i meteorologien, eller drift i instrumentet (Lee, Massman & Law, 2004). Der kan dog rettes op på dette problem ved efterbehandlingen af data. Instationariteten kan medføre gradvise fald eller stigninger i målingerne, hvilket vil skabe en misvisende størrelse af den øjeblikkelige afvigelse fra middel. Målingerne kan derfor detrendes for at fjerne effekten af dette. Her beregnes en funktion for tendensen i data, og denne subtraheres.

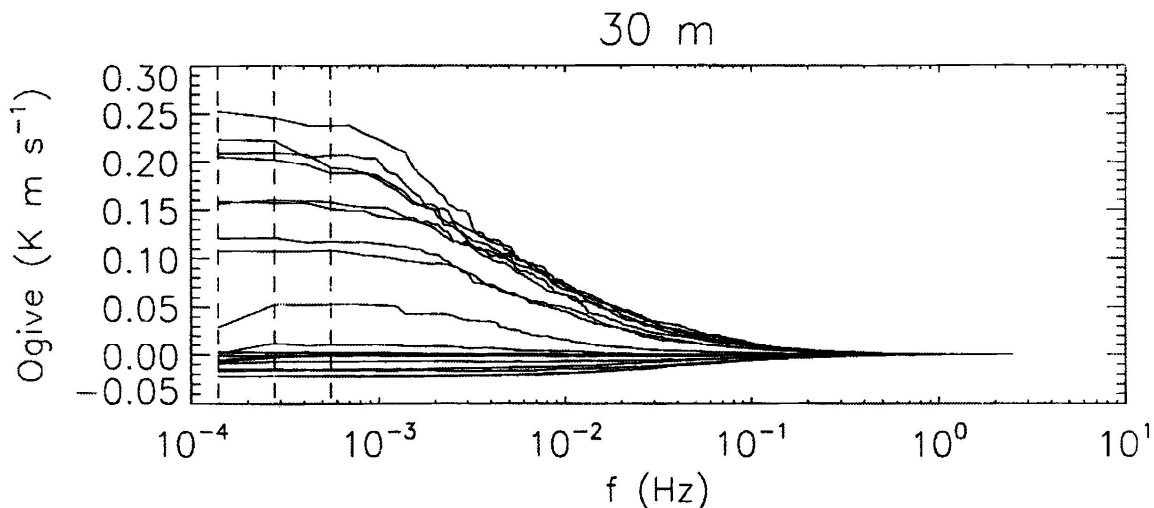
Midlingsperioden bestemmes typisk ud fra målehøjden. Jo højere der måles jo længere midlingsperiode. Dette skyldes at hvirvlernes størrelse i atmosfæren vokser med højden over jordoverfladen (Oke 1987), og der dermed skal måles over en længere periode for at måle på hele hvirvler. Muligheden for instationaritet øges ved lange midlingsperioder, og for korte midlingsperioder vil bevirke at de lavfrekvente hændelser vil mistes i dataopsamlingen. Indenfor overfladelaget vil der typisk midles over 20-30 min (Foken & Wichura, 1996). For hver midlingsperiode roteres koordinatsystemet således at den gennemsnitlige vertikale middelvind bliver 0. Denne operation fungerer som et filter, således at alle turbulente

bevægelser med en periode større end midlingsperioden ikke vil bidrage til den beregnede flux (Lee, Massman & Law, 2004).

De fleste fluxmålinger foretaget indenfor de seneste årtier har anvendt midlingsperioder mellem 10 og 60 minutter (Lee, Massman & Law). Nyere undersøgelser af bl.a. Finnegan et al. (2003), har dog vist at det kan være nødvendigt med endnu længere perioder for at undgå fluxtab pga. filtreringen af de større turbulente bevægelser. Finnegan et al. (2003) fandt en forøgelse af den beregnede CO₂ flux over Amazon på 25% ved en forlængelse af midlingsperioden fra 15 min til 3 timer.

Der er tidligere hyppigt anvendt cospektra sammenlignet med standard spektra fra Kaimal et al. (1972), til bestemmelse af den optimale midlingsperiode. Disse er målt over lav vegetation og derfor ikke optimale ved sammenligning med spektra over høj vegetation (Finnegan, 2000). Den bedst mulige midlingstid kan så bestemmes ved en Ogive funktion, hvilket er integralet under kurven af cospektret for f.eks. momentumfluxen. (Foken & Wichura, 1996; Lee, Massman & Law, 2004). Hvis ogive kurven når til en asymptote, indikerer dette at der ikke er flere bidrag til fluxen efter denne periode.

Ogive plottet viser det samme som cospektret, men da det er en integreret kurve skal det ikke sammenlignes med standardkurver for at bestemme den optimale midlingsperiode (Lee, Massman & Law, 2004, kap.2).



Figur 2.9 Eksempel på Ogive spektre for varmeflux Q_h . De lodrette stiplede linier svarer til midlingsperioder på 120, 60 og 30 min. Det ses at der ikke er yderligere bidrag til fluxen ved frekvenser store end 30 min og dette derfor er lang nok midlingstid til at inddrage de store lavefrekvente hvirvler i målingen (Lee, Massman & Law, 2004).

For at foretage eddykorrelations målinger er det nødvendigt at anvende instrumenter med kort reaktionstid, både for vindkomponenten og den ønskede scalar (Grelle, 1997).

Den optimale frekvens for indsamling rådata varierer for hver enkelt lokalitet med de dominerende stabilitetsforhold og vindhastigheder samt målehøjden over jorden, og overfladens ruhed (Grelle, 1997). Over skove er det normalt accepteret at måle med en frekvens på kun 4hZ (Grelle 1997), og det forudsættes derfor at dette også er acceptabelt over byområde, da begge områder har høj ruhed. Skovområder er derfor den overfladetype der er bedst sammenlignelig med byområder. Da der desuden skal måles forholdsvis højt over både by og skov-områder, vil hvirvlerne der bidrager til transporten være så store, at opsamlingsfrekvensen kan tillades at være forholdsvis lav (Nemitz et al., 2002, A).

Formler for de i projektet anvendte fluxe;

$$\text{Varmeflux} : Q_H = \rho \cdot c_p \cdot \overline{w \cdot T'}$$

$$\text{Partikelflux} : F_{PAR} = \overline{w \cdot C_{PAR}}$$

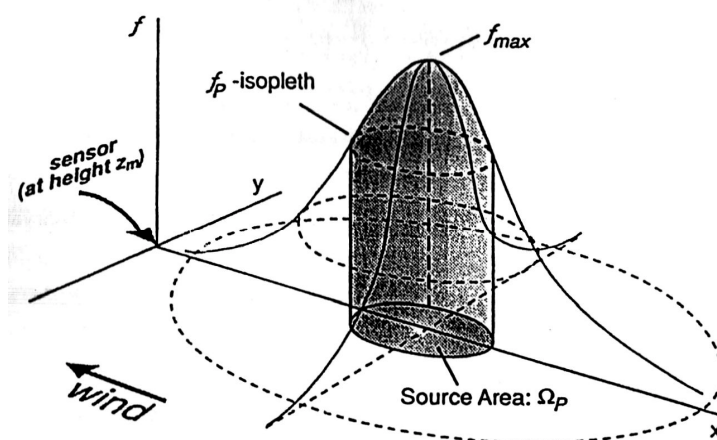
$$\text{CO}_2 \text{ flux} : F_{CO_2} = \overline{w \cdot C_{CO_2}}$$

$$\text{Momentumflux} : \tau = \overline{w' \cdot u'}$$

(2.9)

2.5.1 Kildeområder

Kildeområdet er defineret som det område hvorfra bidragene til den målte fluxmåling kommer. Det fulde område der bidrager kan være uendeligt stort, da nogle stoffer er udsat for lang transport, og det angives derfor typisk som hvorfra 50- eller 80% af fluxene kommer. For at bestemme dimensionerne af dette, kan der anvendes en række forskellige modeller, der kan underinddeles i to hovedkategorier (Grelle, 1997); Langrarian (Sheupp et al. 1990) og spredningsmodeller (Schmid 1994; Horst og Weil, 1992).



Figur 2.10 Kildeområdet som beskrevet af Schmid (1994). f_{max} angiver punktet hvorfra størstedelen af "signalet" stammer. Det ses at kildeområdet er lille tæt på sensoren og vokser mod f_{max} , for herefter at falde igen.

Modeller der anslår kildeområdet form i x, y og z retningen kaldes 3D modeller. Figur 2.10 viser en skitse af sådan et kildeområde.

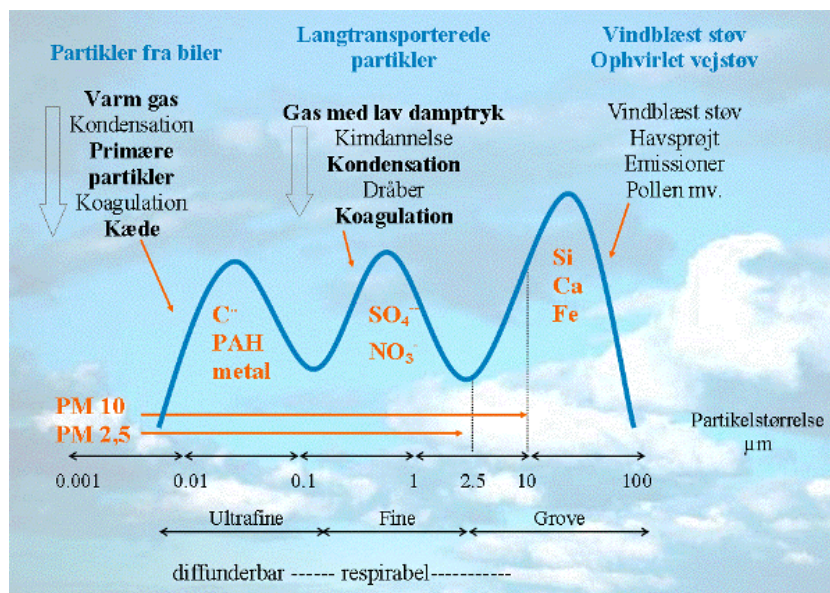
Størrelsen af kildeområdet vil især afhænge af målehighjden, atmosfærens stabilitet og overfladens ruhed (Sheupp et al. 1990). Jo lavere der måles, jo mere ustabil atmosfæren er, og jo mere ru overfladen er, desto mere bidrager de nære områder til målingerne. Det er vist i et byområde, at afstanden til det maksimalt bidragende kildeområde steg med en faktor 5 når forholdene ændredes fra moderat ustabile til nær neutrale (Roth 2000).

2.6 Partikler

Partikler er defineret som faste eller flydende stoffer af varierende kemisk sammensætning, form og størrelse.

Den primære kilde til partikler i luften er trafikken (Palmgrem et al., 1997), men også sekundær dannelse af partikler i atmosfæren som følge af solar stråling, kan bidrage til antallet af især de mindste partikler (Shi et al., 2000, Ketznel et al., 2003).

Partiklerne inddeles typisk i en ultrafin, fin og grov fraktion, defineret ud fra deres størrelse, da denne er en væsentlig indikator for kilde, kemisk sammensætning (figur 2.11) og hvilke skader partiklerne kan medføre.



Figur 2.11 Størrelsesinddeling af partikler, samt angivelse af de vigtigste kilder (www.miljoe.kk.dk).

Ultrafine partikler, også kaldet nanopartikler, har en diameter på ca. 0.001-0.1µm. Den primære kilde til disse partikler er trafikken. Udstødningen fra dieslbiler indeholder store mængder partikler mindre end 0.1µm (Palmgrem et al., 1997), ca. 25 gange flere end fra en benzinbil, men da benzinbilerne udgør omtrent 75% af bilmassen, ligger bidraget fra benzin-

og diesel biler på samme niveau (<http://www.miljoe.kk.dk> 1). Udstødningspartiklerne består primært af svovlforbindelser, sodpartikler og aske. De største partikler på omtrent $0.05\mu\text{m}$ er sodagglomerater (kul), og de mellemste partikler er kondensater af flygtige organiske forbindelser. De mindre partikler på omtrent $0.01\mu\text{m}$ dannes ved afkølingen af udstødningsgassen, hvor svovlsyrer og halvflygtige organiske forbindelser, PAH'er, fortættes på overfladen af f.eks. en sodkerne og danne nye partikler ved nukleation (Miljøkontrollen, KK, 2004).

De ultrafine partikler har en begrænset levetid i atmosfæren, da de hurtigt vil koagulere med vanddamp eller andre gasformige stoffer, og danne større partikler.

De fine partikler har en diameter på $0.1-2.5\mu\text{m}$, og stammer primært fra kemiske omdannelser i atmosfæren og fysiske processer, som koagulering af mindre partikler. Denne proces kan vare op til flere døgn, og disse partikler har derfor en længere levetid. Mange af de fine partikler er derfor langtransport fra f.eks. Østeuropas kraftværker (www.miljoe.kk.dk1). Sodpartikler fra ufuldstændig forbrænding, kan falde ind under både den ultrafine og den fine størrelsesfraktion, med en middeldiameter på $0,9\mu\text{m}$.

Akkumulation mode partikler hører også under denne fraktion. De har en størrelse af $0.1-1\mu\text{m}$ og er den fraktion der har den længste levetid i atmosfæren, den største lys-spredningsevne og udgør den største del af kondensationskerner i skyer (IPCC, 2001, 5)

De grove partikler er større end $2.5\mu\text{m}$, og kommer primært fra mekaniske processer som slitage på dæk og vejbelægning, og fra ophvirvling af støvpartikler (Palmgren et al., 1997). I kystnære områder kan salt fra havsprøjt også have en betydning, ligesom byggeri og industri kan have en lokal effekt.

Disse partikler har en kort levetid i atmosfæren, da de hurtigt udfældes, afsættes på overflader eller udvaskes med nedbør (www.miljoe.kk.dk).

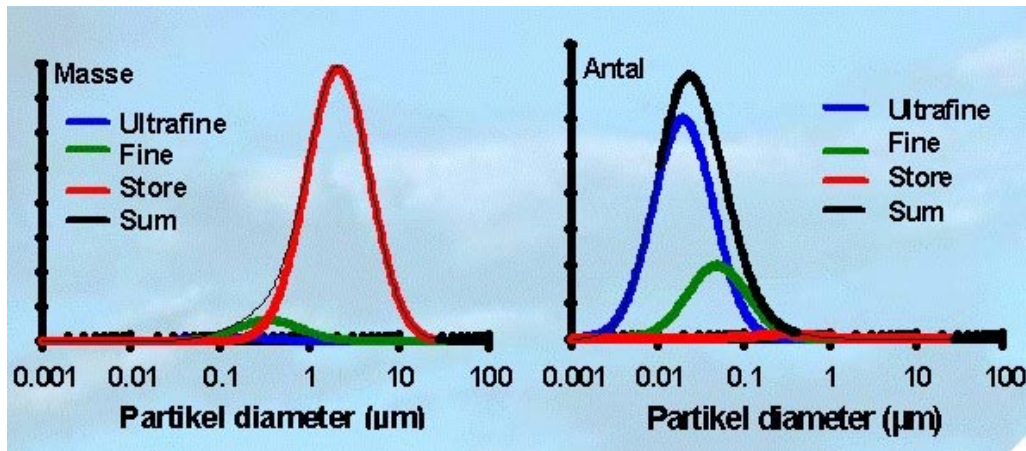
Spredningen af de små partiklerne i luften er meget lig spredningen af gasser. Tyngdekraften har nemlig kun nævneværdig påvirkning på partikler større end $10\mu\text{m}$ (Palmgren et al., 1997)

2.6.1 Måling af partikler

Globale målinger af partiklerne i atmosfæren kan foretages ud fra satellit billeder, og gennem feltmålinger i globale netværk (IPCC, 2001, kap.5).

Ved feltkammer måles partiklerne hyppigst som "Total Suspended Matter" (TSP), der er svævestøv mindre end $30\mu\text{m}$, eller som "Particulate Matter" (PM). Her inddeles de i PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ og $\text{PM}_{0.1}$, hvor tallene angiver den maksimale diameter i μm , af partiklerne i den målte fraktion (www.miljoe.kk.dk). De ultrafine partikler måles ved $\text{PM}_{0.1}$, de fine ved $\text{PM}_{2.5}$, og de grove ved TSP eller PM_{10} målinger.

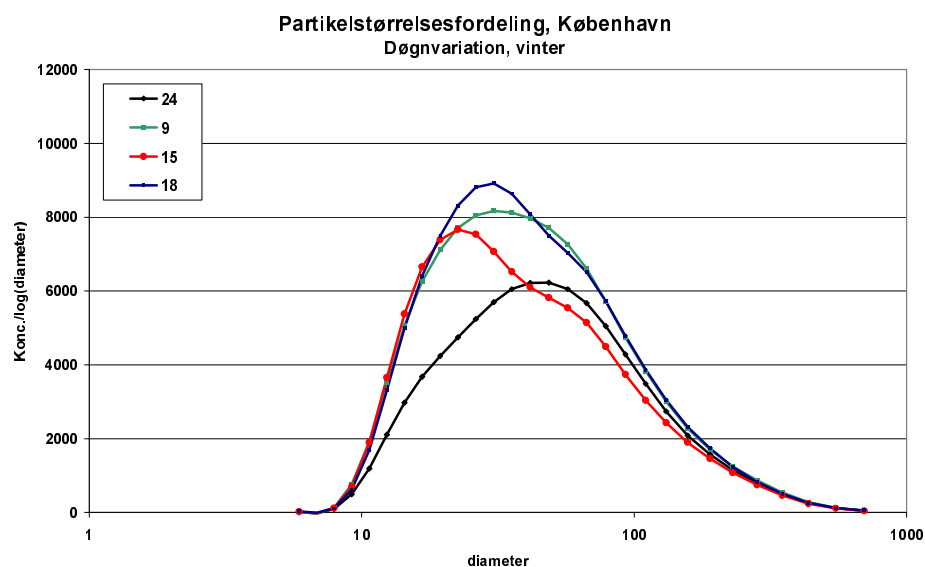
Det vil i fremtiden være nødvendigt ikke kun at måle vægten af partiklerne, men også antallet. Ved en vægtmåling vil de mindste partikler ikke bidrage synderligt, da en partikel med diameteren $1\mu\text{m}$ omtrent vil veje det samme som 1 mia. ultrafine partikler med en diameter på



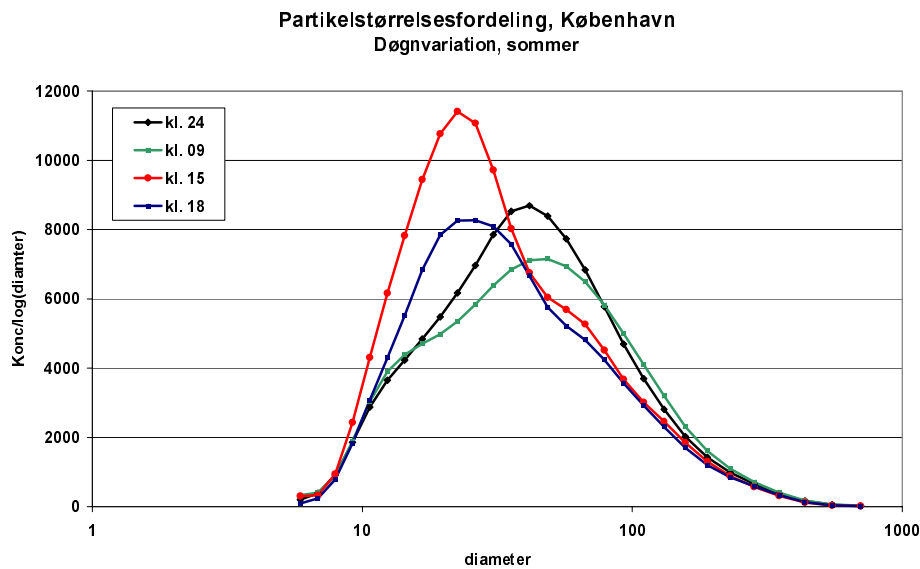
Figur 2.12 Målemetoden skal vælges ud fra hvilken partikelstørrelse man ønsker at vurdere. Ved måling af massen af partiklerne i luften vil de største partikler dominere. Ved målinger af partikelantallet vil de ultrafine partikler derimod dominere målingerne. (www.miljoe.kk.dk)

$0.01\mu\text{m}$. Derimod vil de grove partikler give et ubetydeligt bidrag til målinger af partikelantallet (figur 2.12).

DMU har målt partikelstørrelsesfordelinger i antal partikler fra målestationen på HCØ (figur 2.13 og 2.14). Partikelstørrelsesfordelingen svinger over døgnet og året. Eftermiddagstimerne har en større andel små partikler i forhold til natte- og formiddagstimerne, hvilket er mere udtalt i sommerperioden end vinterperioden.



Figur 2.13 Partikelstørrelsesfordeling fra HCØ ud fra data fra DMU, 1/9-17/12 2004.



Figur 2.14 Partikelstørrelsesfordeling fra HCØ ud fra data fra DMU, 7/5-31/8 2004.

2.6.2 Måling af partikelflux

Den vertikale partikelflux kan måles direkte ved eddykorrelationsmetoden (Held & Klemm, *in press*).

Den typiske opstilling anvender soniske målinger af den vertikale vindhastighed og en optisk partikeltæller. For at kunne måle fluxe ved brug af en partikeltæller, kræver det at instrumentet har en høj flow rate og en kort reaktionstid (Buzorius, 2001).

Tidlige studier med eddykorrelations-opstillingen startede allerede i 1980'erne, men led under problemer med for langsomme partikeltællere. Dette er dog afhjulpet i dag (Held & Klemm, *in press*), selvom partikeltællerne stadig ikke er oppe på samme opsamlingsfrekvens som de soniske vindmålere. Et andet problem med de tidlige studier var at partikeltællerne kun kunne detektere partikler større end 100nm. Dette er også afhjulpet i dag ved brugen af kondensations partikeltællere, der kan måle partikler ned til 3nm i diameter (TSI instruments).

2.6.3 Påvirkning af strålingsbalancen

De antropogent dannede partikler i troposfæren påvirker klimaet på to punkter; spredning af den indgående stråling, samt en øget skydannelse (Hinds, 1999, kap. 14; IPCC, 2001, 5). Dette er også kaldet "Whitehouse" effekten, da den i modsætning til "greenhouse" effekten vil nedkøle jorden. Der er dog væsentlig større usikkerhed omkring størrelsen af effekten af partiklerne end drivhuseffekten (se figur 1.1). Dette skyldes bl.a. at partiklerne der er årsag til nedkølingen har en typisk levetid i atmosfæren på en uge, hvor gasserne der resulterer i opvarmningen har levetider på årtier (Hinds, 1999, kap. 14).

2.6.4 Helbredseffekterne af partikelforurening

En række internationale undersøgelser har vist sammenhæng mellem luftforureningen i byområder og befolkningens helbredstilstand (Palmgren et al., 1997). Dette er dog, som nævnt, ikke nogen ny observation. Det nye er hvor væsentlig en effekt forureningen faktisk har på vores helbred, og hvilken type forurening der især er sundhedsskadelig.

Den seneste forskning tyder på at det især er de ultrafine partikler der er sundhedsskadelige, da de kan forårsage hjertekarsygdomme via deres effekt på blodets evne til at koagulere, være kræftfremkaldende via de stoffer de består af, samt være årsag til betændelsestilstande i lugerne (Donaldson et al., 2001; Dockery et al., 2001, Schwatz et al., 1999). De ultrafine partikler er i stand til at trænge dybt ned i lungerne og ud i alveolerne (celler i lungerne hvor luftudvekslingen til blodet foregår) hvor de indkapsles, og derfor meget svært og langsommeligt fjernes igen. De ultrafine partikler kan desuden bevæge sig helt ud i blodbanerne hvor de påvirker blodets viskositet, og kan føres til alle de vigtige organer. De større partikler afsættes i de øvre dele af luftvejene, og transporteres let ud af kroppen igen (www.miljoe.kk.dk). Disse er derfor ikke nær så skadelige, men er dog generende for astmatikere og lungesyge.

En anden årsag til at de mindste partikler udgør en større sundhedsrisiko end de grovere partikler, er forskellen i kemisk sammensætning. De groveste partikelfraktioner består primært af støv, mens de fine og ultrafine hyppigt stammer fra forbrænding af diverse brændstoffer, og derfor indeholder en stor mængde sundhedsskadelige stoffer (Schwatz et al. 1999). De mindste partikler har desuden en større overflade pr. vægtenhed, hvorfor de kan have en stor mængde stoffer som f.eks. PAH'er og tungmetaller bundet på overfladen.

Det er især personer der i forvejen lider af hjerte-kar- eller luftvejssygdomme der er påvirket af partikelforureningen. Også ældre og børn er meget udsatte. Børnene opholder sig tættere på trafikken pga. deres lave højde, og er desuden mere udsatte pga. højere vejtrækning pr. kropsvægt end voksne.

I 1999 fremlagde Embedslægen og Miljøkontrollen undersøgelser for Storkøbenhavn, der viste 100-300 for tidlige dødsfald og 200-500 ekstra indlæggelser som følge af partikelforurening (PM₁₀). Disse tal anses i dag som en undervurdering af problemet, da der dengang ikke var kendskab til, at partiklerne er medårsag til hjerte-karsygdomme, og er kræftfremkaldende (www.miljoe.kk.dk). Hvis udenlandske undersøgelser kan overføres til Danmark vil et fald i PM₁₀ på 30% resultere i 500 færre dødsfald pr. 1 mio. indbyggere i byområder (Palmgren et al., 1997).

2.6.5 Lovgivning og regulering

Forureningen i vores luft kan reguleres ved en række forskellige lovmæssige tiltag og målsætninger. Der kan sættes grænseværdier på totale emissioner for grupper af kilder (f.eks. industrien eller busser og lastbiler), for indhold af visse stoffer i brændstoffer (f.eks. bly), og

for den totale mængde der måles i luften. Siden 1990 har der været emissionsgrænser på NOX'er og kulbrinter fra benzinbiler, hvilket har medført indførslen af katalysatorer på alle biler herefter. Der har også været tiltag til at gøre benzinen mindre forurenende, og de fleste nyere benzinbiler er derfor meget mindre forurenende end for 20 år siden.

Dieselbiler har derimod stadig en høj emission af partikler. Den mest effektive metode til at reducere dette er partikelfiltre. Disse fjerner ca. 99% af de ultrafine partikler fra udstødningsgassen. Benzinbilerne har på nuværende tidspunkt et meget lavere udslip af ultrafine partikler. Dette vil ændre sig når der indføres nye motorer, der fungerer som dieselbilernes, ved at anvende mindre brændstof og dermed udsende mindre CO₂. Til gengæld har disse biler samme partikeludslip som dieselbilerne, og det vil derfor blive nødvendigt at påføre disse biler filtre (www.miljoe.kk.dk).

Den nuværende EU lovgivning for partikelkoncentrationer er bestemt for niveauet af PM₁₀, bestemt i vægt. Koncentrationen i luften på ikke overstige 50µg/m³ mere end 35 gange om året, og den gennemsnitlige årlige koncentration må maksimalt blive 40µg/m³ (Sokhi et al., 2001). Denne lovgivning tager, som nævnt, ikke hensyn til at det er de ultrafine partikler der er mest sundhedsskadelige, og at niveauet af disse ikke vil fremgå ud fra en måling af vægtkoncentrationer.

3 Metode

Der vil i metode afsnittet blive gennemgået beskrivelser af lokaliteten, instrumenteringen og databehandlingen. Da data fra fluxmålinger gennemgår en række beregninger, er der blevet lagt vægt på at beskrive databehandlingen detaljeret, så det tydeligt fremgår hvilken efterbehandling der er valgt for at nå til de efterfølgende resultater.

3.1 Dataindsamling

3.1.1 Lokalitetsbeskrivelse

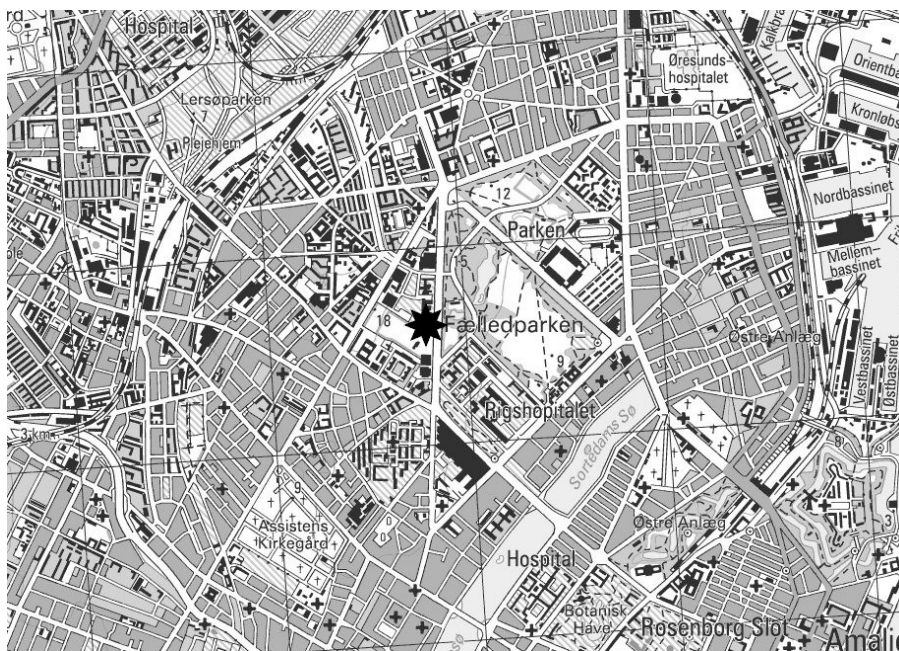
Målingerne i dette projekt er foretaget i København, en storby i Øresundsregionen beliggende på $55^{\circ}41' N$, $12^{\circ}33' O$. Byens indbyggertal er på ca. 500.000 fordelt på ca. 100 km^2 (www.sk.kk.dk).

København er en forholdsvis lavt bebygget by, med størstedelen af bygningsmassen på under 6 etager pga. en byplanspolitik fra midten af det forrige århundrede (personlig kommentar fra C.W. Matthiesen, Geografisk Institut).

Forsøgsopstillingen er placeret i en mast på taget af HCØ i Universitetsparken på Nørrebro (figur 3.1). Bygningen er ca. 20 m høj med et fladt tag, hvorpå en 10m høj instrumenteringsmast er placeret (figur 3.3 og 3.4).

Pga. målestationens høje placering betragtes den som en bybaggrundsstation, hvorfra der måles en blanding af emissioner fra et større område af København.

Målestationen anvendes af flere forskningsinstitutioner, bl.a. af DMU til adskillige målekampagner samt vedvarende klimatologiske målinger.

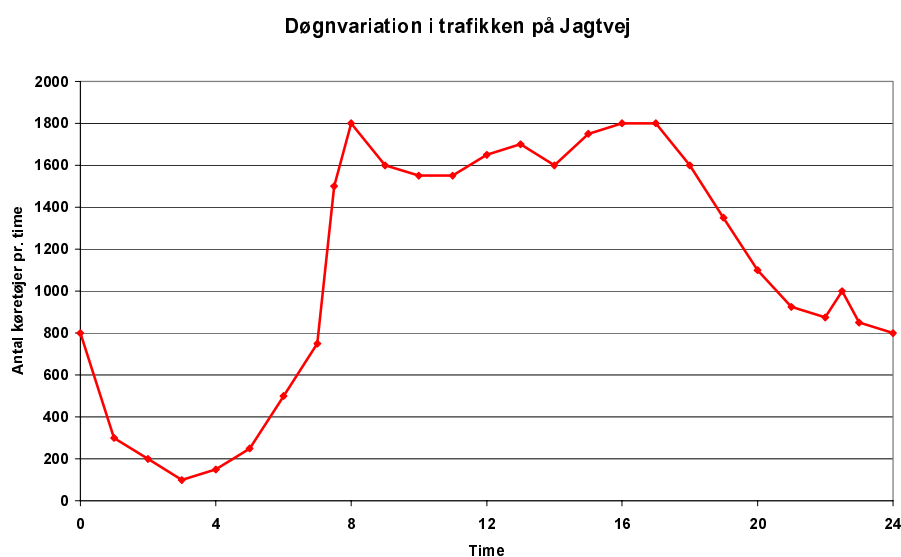


Figur 3.2 Placering af målestation er markeret med "stjerne" på kortet over Nørrebro og Østerbro i København. Hvert kvadrat er 1*1km.

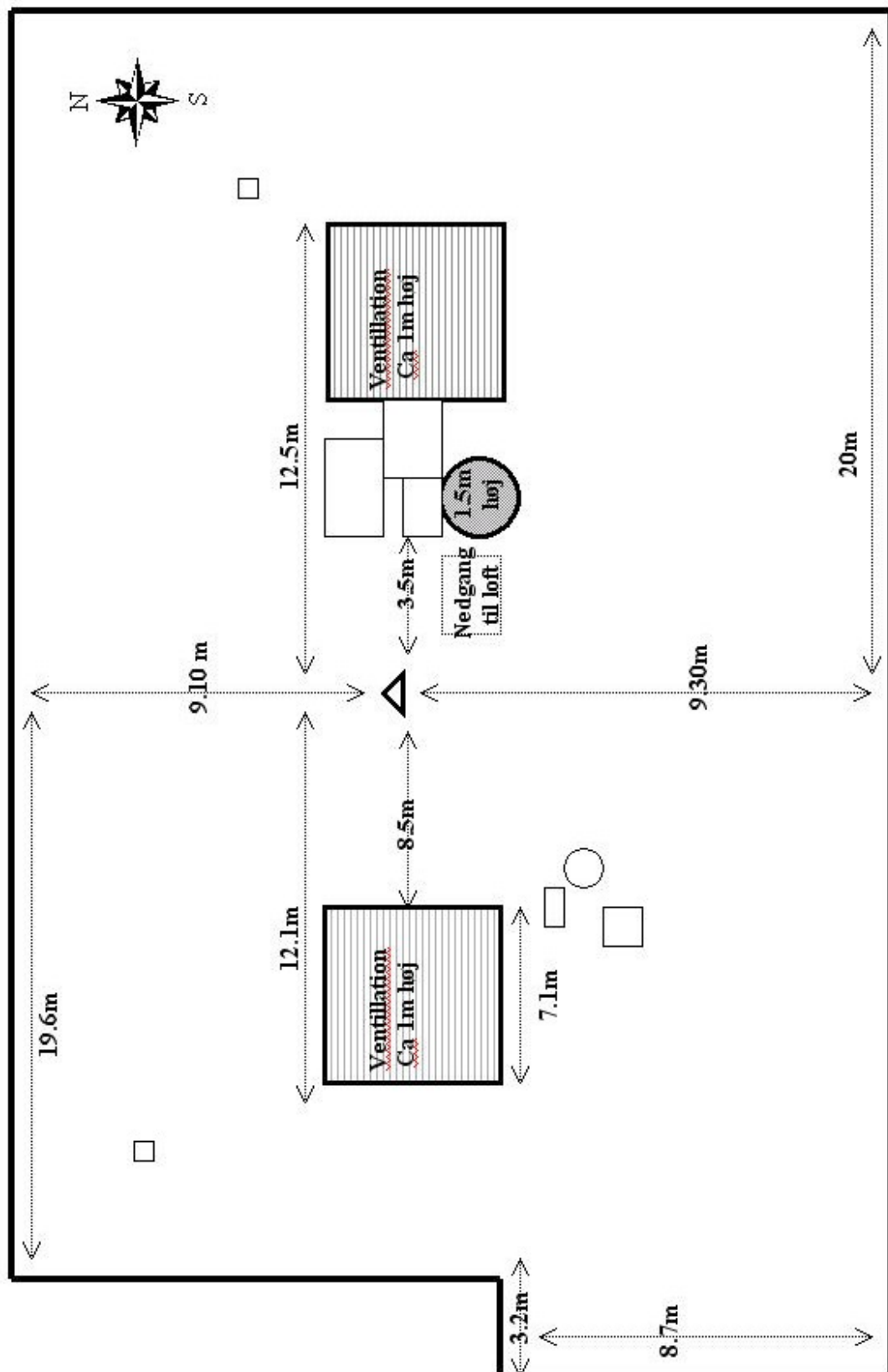
De omkringliggende områder består af beboelseskvarterer, Fælledparken, der er et grønt areal på 0,8 km² og de stærkt trafikerede veje; Jagtvej og Nørre Allé. Se figur 3.4 for fotos omkring masten.

Møller (2003, specialeafhandling) har ved hjælp af GIS modellering af bygningsdata fra Københavns og Frederiksberg kommuner, bestemt den gennemsnitlige bygningshøjde til 14.2m med en standardafvigelse på 6.4m. Det højest bebyggede område, med gennemsnitshøjder på 16-22m, strækker sig fra HCØ og ca. 2.5km sydøst til 2.5 km sydvest herfra. Forholdet mellem bygningshøjde og bygningsafstand (H/W) ligger mellem 0.1 og 1.58, med de højeste værdier i området fra HCØ og ca. 2.5km sydøst til 2.5 km sydvest herfra, hvor gennemsnittet ligger på omtrent 0.5. Dette resulterer i et gennemsnitligt ”slipstrøm” over området, hvor strømmingen omkring den ene bygning vil påvirke strømmingen omkring den næste (figur 2.4)

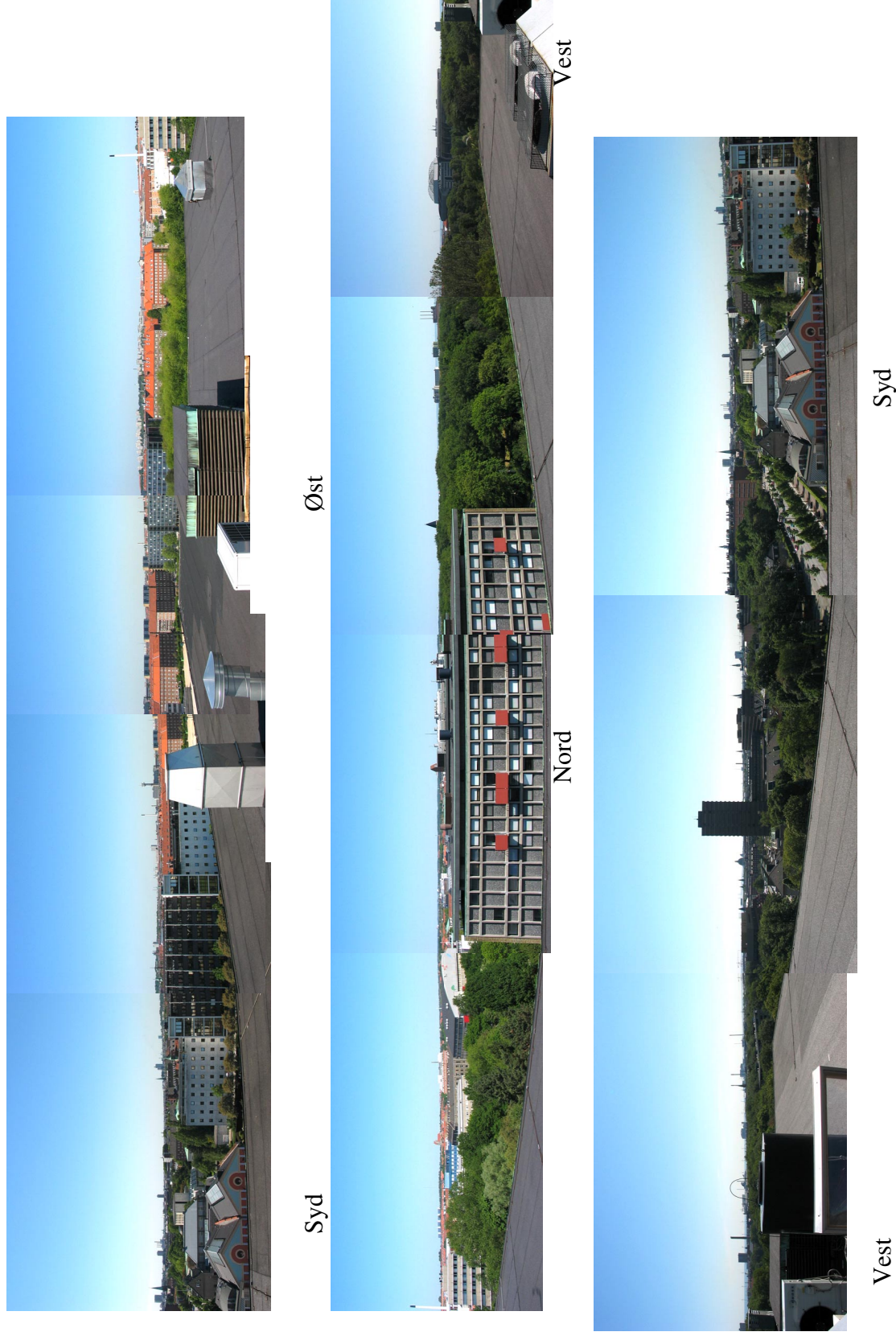
Området omkring HCØ er kraftigt trafikeret. På Jagtvej passerer 15.800 køretøjer i tidsrummet kl.06-18, hvoraf 6,3% er tung trafik (over 3,5 tons). På Nørre Allé passerer 30.200 køretøjer i samme tidsrum hvoraf 3,6% er tunge køretøjer. Trafikintensiteten i København er stort set ens gennem hele året, bortset fra et mindre fald i juli måned (tal fra 2002/2004, www.vejpark.kk.dk 1). Figur 3.2 viser døgnvariationen af trafikken på jagtvej i hverdage, målt vha. video-tælling af Ketzal et al.. (2003) i 2002. Minimum forekommer i de tidlige morgentimer med mindre end 100 køretøjer i timen, og stiger til et maksimum på 1800 køretøjer i timen kl. 08-09 i morgenmyldretiden. Indtil kl. 18 er trafikken forholdsvis stabil med ca.1600 køretøjer i timen. Weekend trafikken udviste en lignende kurve, dog med lavere værdier og maksimum mellem kl. 12.30 og 16.



Figur 3.3 Døgnvariation i trafikken på hverdage på Jagtvej i København aflæst fra video-tælling (Ketzal et al., 2003)



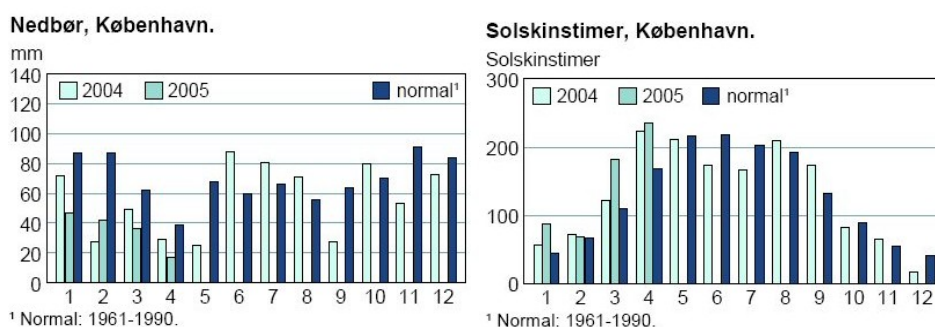
Figur 4.3 Skitse af taget på HCØ bygningen. Ikke målfast. Trekanten på midten af taget er placeringen af masten.



Figur 3.4 Fotos fra taget af HCØ bygningen. Mod syd ses Idrætsinstituttet. Mod nord ses Matematik bygningen, og mod syd-sydvest ses Nørre Alle.

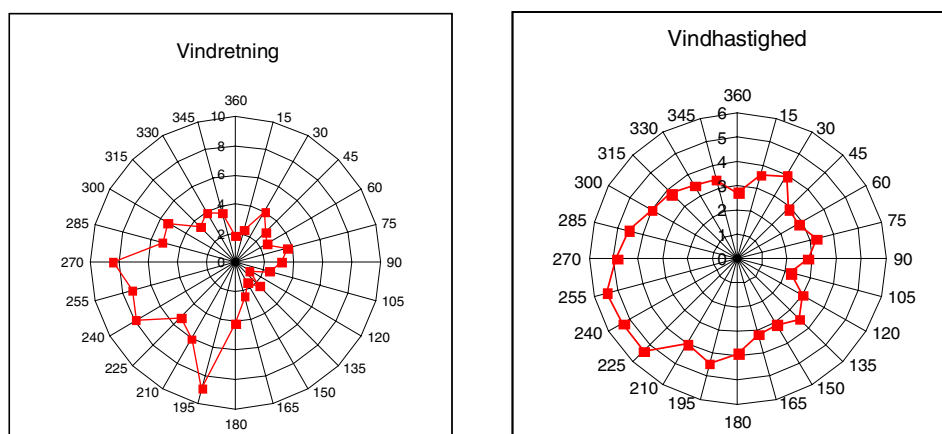
3.2 Måleperiode

Data er indsamlet i perioder af vekslende varighed i tidsrummet maj 2004 til februar 2005. Målingerne forløber over 128 døgn, fordelt over 8 måneder. Målingerne er foretaget hele døgnet, og opsamlet på ½times basis. Figur 3.7 viser en kalender over måleperioderne. Årsagen til de spredte måleperioder og den varierende længde af dem, er primært problemer med partikeltælleren, der jævnligt skulle til reparation pga. vanddamp i systemet. Derudover har der været flere strømnedbrud, og problemer med gasanalysatoren. Vejret i måleperioden har adskilt sig fra normalperioden 1961-'90 ved at juni og juli '04 var mindre solrige og havde mere nedbør end normen. Til gengæld var nedbøren mindre i januar og februar '05 end normalt (figur 3.5). D. 8/1-'05 blev Danmark ramt af en kraftig storm, der enkelte steder i landet kom helt op på orkan styrke. I København blev der registreret middelvinde op til 24m/s og vindstød på 35 m/s. Stormen var forårsaget af et dybt lavtryk over det sydlige Norge, hvilket gav de kraftigste vinde i den nordvestlige del af Danmark, og hørte til blandt de 10 kraftigste indenfor de sidste 100 år (www.dmi.dk 1).



3.5 Klimadata for 2004-2005 og normalperioden 1961-'90 (Københavns kommune, www.sk.kk.dk 1)

Den dominerende vindretning i København er fra syd-vest, med en gennemsnitlig vindhastighed på 5.2 m/s (Københavns kommune, www.sk.kk.dk 1). Dette afspejles i data fra indeværende forsøg, der viser en høj hyppighed af sydvestlige vinde, hvilket også er den retning, der har den højeste gennemsnits vindhastighed (figur 3.6).



Figur 3.6 Frekvensfordeling af vindretninger og gennemsnitlig vindhastighed fordelt på vindretninger.

MAJ		JUNI		JULI		AUGUST		SEPTEMBER	
L 1		T 1		T 1		S 1		O 1	
S 2		O 2		F 2		M 2		T 2	
M 3	19	T 3		L 3		T 3	32	F 3	
T 4		F 4		S 4		O 4		L 4	
O 5	Danmarks fødselsdag 1945	L 5		M 5	28	T 5		S 5	
T 6		S 6		T 6		F 6		M 6	37
F 7		M 7	24	O 7		L 7		T 7	
L 8		T 8		T 8		S 8		O 8	
S 9		O 9		F 9		M 9	33	T 9	
M 10	20	T 10		L 10		T 10		F 10	
T 11		F 11		S 11		O 11		L 11	
O 12		L 12		M 12	29	T 12		S 12	
T 13		S 13		T 13		F 13		M 13	38
F 14		M 14	25	O 14		L 14		T 14	
L 15		T 15		T 15		S 15		O 15	
S 16		O 16		F 16		M 16	34	T 16	
M 17	21	T 17		L 17		T 17		F 17	
T 18		F 18		S 18		O 18		L 18	
O 19		L 19		M 19	30	T 19		S 19	
T 20		S 20		T 20		F 20		M 20	39
F 21		M 21	26	O 21		L 21		T 21	
L 22		T 22		T 22		S 22		O 22	
S 23		O 23		F 23		M 23	35	T 23	
M 24	22	T 24		L 24		T 24		F 24	
T 25		F 25		S 25		O 25		L 25	
O 26		L 26		M 26	31	T 26		S 26	
T 27		S 27		T 27		F 27		M 27	40
F 28		M 28	27	O 28		L 28		T 28	
L 29		T 29		T 29		S 29		O 29	
S 30		O 30		F 30		M 30	36	T 30	
M 31	23			L 31		T 31			

OKTOBER		NOVEMBER		DECEMBER		JANUAR		FEBRUAR	
F 1		M 1	45	O 1		L 1	53	T 1	
L 2		T 2		T 2		S 2		O 2	
S 3		O 3		F 3		M 3	1	T 3	
M 4	41	T 4		L 4		T 4		F 4	
T 5		F 5		S 5		O 5		L 5	
O 6		L 6		M 6	50	T 6		S 6	
T 7		S 7		T 7		F 7		M 7	6
F 8		M 8	46	O 8		L 8		T 8	
L 9		T 9		T 9		S 9		O 9	
S 10		O 10		F 10		M 10	2	T 10	
M 11	42	T 11		L 11		T 11		F 11	
T 12		F 12		S 12		O 12		L 12	
O 13		L 13		M 13	51	T 13		S 13	
T 14		S 14		T 14		F 14		M 14	7
F 15		M 15	47	O 15		L 15		T 15	
L 16		T 16		T 16		S 16		O 16	
S 17		O 17		F 17		M 17	3	T 17	
M 18	43	T 18		L 18		T 18		F 18	
T 19		F 19		S 19		O 19		L 19	
O 20		L 20		M 20	52	T 20		S 20	
T 21		S 21		T 21		F 21		M 21	8
F 22		M 22	48	O 22		L 22		T 22	
L 23		T 23		T 23		S 23		O 23	
S 24		O 24		F 24		M 24	4	T 24	
M 25	44	T 25		L 25		T 25		F 25	
T 26		F 26		S 26		O 26		L 26	
O 27		L 27		M 27	53	T 27		S 27	
T 28		S 28		T 28		F 28		M 28	9
F 29		M 29	49	O 29		L 29		T 29	
L 30		T 30		T 30		S 30		O 30	
S 31				F 31		M 31	5		

Figur 3.7 Kalender over måleperioden. Blå markeringer: vindmålinger. Røde markeringer: partikel målinger. Grønne markeringer: CO₂ målinger. Perioder med fejlmålinger af partikler og CO₂ er ikke markeret. Forskellen mellem den blå markering, og den røde og grønne, indikerer dermed perioder med fejlmålingerne.

3.3 Instrumentering

Den samlede opstilling består af en infrarød gasanalysator (LI-COR 6262) til måling af CO₂ koncentrationer, en partikeltæller (CPC 3010) med filter, et 3D sonisk anemometer, en converter, samt 2 eksterne pumper og en bærbar computer til dataopsamling. Signalerne fra gasanalysatoren og partikeltælleren sendes gennem samme kabel som målinger fra det soniske anemometer for at samle alle data. Herfra føres signalet ned til converteren, der omdanner det til et voltoutput, der opsamles i en tilkøbet bærbar computer. Der føres i alt 6 kanaler med data gennem systemet; u, v, og w vindkomponenter, og CO₂, partikler og temperatur. Data opsamles via programmet ANEMCOM i filer af 30 minutters varighed til senere efterbehandling.

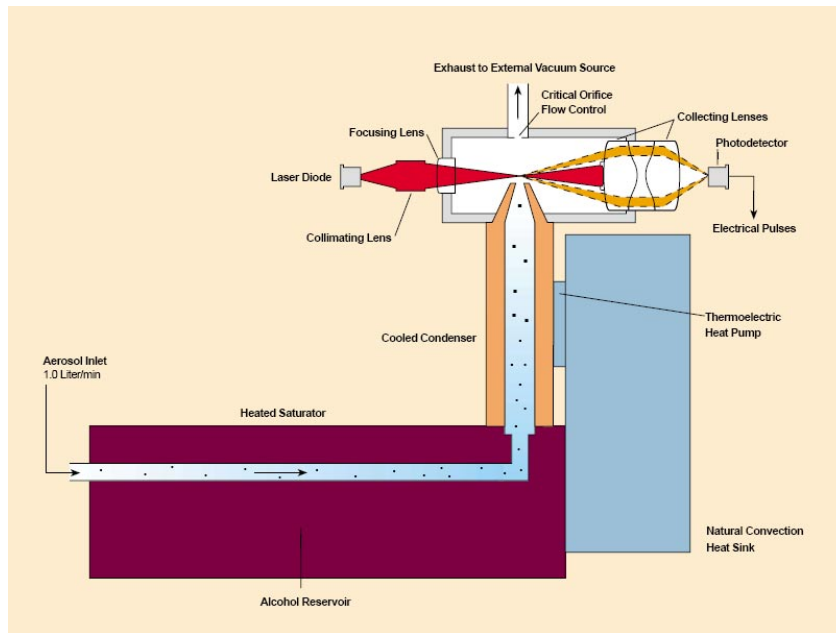
3.3.1 Partikeltæller

Partikelantallet blev målt med en Kondensations Partikeltæller model 3010 fra TSI Instruments (Condensation Particle Counter, herefter betegnet som CPC). Partikeltælleren skal placeres så den holdes fri for regn, samt hvor temperaturen ikke går under 5°C eller over 40°C.

CPC 3010 kan måle antallet af partikler i størrelsen 10nm-3µm, op til en koncentration på 10.000cm⁻³. Instrumentet har en reaktionstid på under 5 sekunder for detektion af 95% af koncentrationsændringer. Vha. en ekstern pumpe der reguleres til et konstant flow på 1L/s af en kritisk dyse, suges luft ind i instrumentet. Her passerer luften et kammer mættet med butanol, hvorefter den nedkøles og alkoholen kondenserer på de enkelte partiklers overflade. Dermed forøges deres diameter, til en lettere detekterbar størrelse. Luften passerer herefter en laserstråle og spredningen af strålen registreres (figur 3.8).

Temperaturforskellen mellem mætningskammeret og kondensationskammeret er sat til standard på 17 grader. Det er dog muligt at indstille instrumentet til en temperaturforskel på 20 grader, hvormed den detekterbare partikelstørrelse bliver mindre. Dette diskuteres senere.

Da butanolen kan fordampe fra CPC skal dette påfyldes undervejs i måleperioden. Der kan desuden opstå fejlmålinger hvis butanolen blandes med vand fra luften, da blandingen skal være ren for at give korrekte målinger.



Figur 3.8 Diagram over metoden til partikeltælling i en kondensations partikeltæller (<http://www.tsi.com/products/cpc3010.aspx>)

Forud for denne målekampagne, er der foretaget en række indledende forsøg med en CPC for at afprøve opstillingen. Disse forsøg blev foretaget henholdsvis i kælderen og på taget af Geografisk Institut i København. Formålet med disse forsøg var at få et indblik i CPC's muligheder for indstillinger, opstilling med et sonisk anemometer, responstid, output registrering o.l., samt for at få et indblik i forholdet mellem CO₂ og partikelkoncentrationer.

Da det ikke var muligt at få adgang til 3010 CPC på dette tidspunkt, blev forsøgene foretaget med en 3022A CPC (udlånt fra Arbejdsmiljø Institutet). Denne CPC har en lavere flowrate (0.3l/s), kan måle koncentrationer op til 10⁷ partikler cm⁻³, og ned til 7nm i diameter. Disse forskelle er dog ikke væsentlige ift. formålet med det indledende forsøg, da instrumenterne ellers fungerer ensartet.

Da CPC maksimalt kan registrere koncentrationer på 10.000 partikler/cm³, hvilket hyppigt overskrides ved målinger i byområder (Dorsey et al., 2002), er det nødvendigt at påsætte et filter for at fortynde signalet til instrumentet (se figur 3.10).

Ved jævnlige målinger af strømmingen, blev det sikret at 50% af indtaget til instrumentet var gennem filteret, således at der kunne måles koncentrationer op til 20.000 partikler/cm³. Indtaget til CPC'en er et 10m langt kobberrør med en diameter på 0.38cm. Kobberrøret sikrer at så få partikler som muligt adhæderer til indersiden, hvilket der er langt større risiko for med slanger af plastisk materiale.

Output fra CPC er i dette forsøg sat til et voltsignal mellem 0- og 10V.

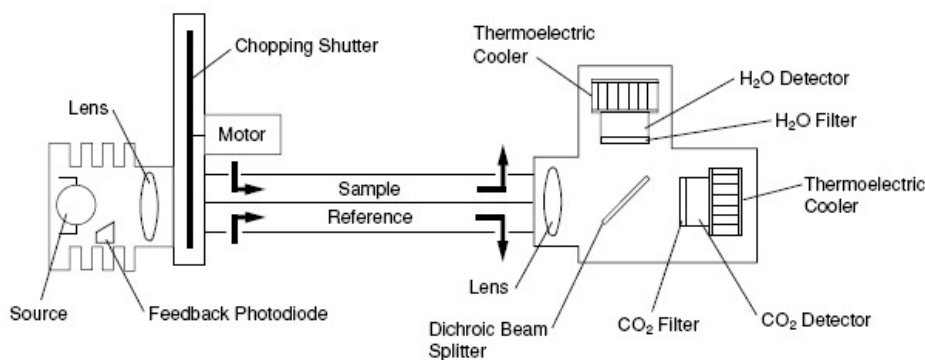
3.3.2 CO₂ gasanalysator

CO₂ koncentrationen er målt med en lukket system infrarød gasanalysator, LI 6262 (LI-COR instruments).

LI 6262 er et hyppigt anvendt instrument til fluxmålinger på CARBOEUROPE og AMERIFLUX målestationer, bl.a. pga. at det lukkede system tillader, at indtaget kan forlænges med en slange, og instrumentet kan placeres et stykke væk fra det soniske anemometer, i et beskyttet miljø (Grelle et al., 1997).

CO₂ koncentrationen i luften måles ved at sammenligne ufiltreret luft med en referenceværdi, der bestemmes ved at sende en del af den indsugede luft gennem et filter. Forskellen i absorption af infrarødt lys mellem de to luftprøver resulterer i en måling af koncentrationen af CO₂ (<http://www.licor.com/env/>).

I dette forsøg er en ekstern pumpe tilkoblet instrumentet for at opnå et flow på 6 L/min.



Figur 3.9 Skematisk figur af LICOR 6262 gasanalysator (LICOR inc., Manual LICOR 6262, kap3).

CO₂ indtaget er en 10m lang slange af typen Bev-A-Line plast fra LI-COR Instruments, hvilket er et materiale der skulle sikre optimal gennemstrømning af CO₂, med en diameter på 0.6 cm.

3.3.3 Sonisk anemometer

Til at bestemme vind og turbulens er anvendt et tredimensionelt ultrasonisk anemometer fra Gill Instruments Ltd. (se forsidefoto), der måler med en frekvens på 4Hz.

Det soniske anemometer er især anvendt til at måle fluxe via eddykorrelationsmetoden, da det opfylder kravet om højfrekvente målinger.

Instrumentet måler vindhastigheden i de tre retninger; horisontalt, lateralt og vertikalt (u, v og w). Instrumentet består af 3 sæt af en sender og en modtager, der måler tiden mellem en afsendt ultrasonisk lydimpuls til modtagelsen. Ud fra dette beregner instrumentet vindens hastighed i 3 retninger ved sammenligning med lydets hastighed i stille luft.

Det er, som nævnt, standard procedure at rotere akserne ved efterbehandlingen af data, så den vertikale middelvind altid ligger i 0. Dette forudsætter dog at der ikke er en turbulens struktur omkring instrumentet der bevirker at middelvinden konsekvent afviger fra 0 i nogle retninger. Hermed indføres en fejl, der reelt er forårsaget af en flow-forvridning pga. omgivelserne.

Også selve instrumentet kan forstyrre strømmingen (Foken & Wichura, 1996; Grelle, 1997). Dette gælder for instrumenter med bøjler placeret i vinklerne 0, 120 og 240 omkring sensorhovedet. I dag anvendes i stigende grad sensorer uden bøjler, netop af denne årsag. Der er dog tale om forholdsvis små korrektioner, især når der ses på gennemsnitsværdier. Grelle (1997) har registreret en korrektion på gennemsnitligt 3.2% i scalare fluxe over et skovområde, med maksimale korrektioner på 8-9% i de mest kritiske indgangsvinkler. Korrektionerne var dog væsentligt større ved momentumfluxen, da denne anvender alle 3 vindkomponenter. Her fandt Grelle (1997) korrektioner på op til 30% i de kritiske vindretninger.

De anvendte korrektioner er opnået ved vindtunnelforsøg på det benyttede soniske anemometer, og dermed under laminar strømning. Korrektionerne vil derfor typisk være overvurderet i forhold til målinger i den frie atmosfære. Dette skyldes at turbulent strømning vil udjævne forstyrrelsen forårsaget af bøjlerne hurtigere end det laminar flow i vindtunnelen (Foken & Wichura, 1996).

3.3.4 Thermocouple

Temperaturen registreres med en thermocouple. Denne består af to metaltråde i forbindelse, en konstantan og en kobbertråd. Den ene forbindelse udgør sensoren, og små udsving i spændingen over de to tråde kan omsættes til temperaturudsving.

Hvis de to forbindelser er ved to forskellige temperaturer og hvis den ene temperatur er kendt, kan den faktiske temperatur ved sensoren bestemmes. Uden denne kan udsvingene i temperaturen dog stadig anvendes (Oke 1987, Appendix A2).

Ved denne målekampagne er der anvendt en thermocouple, der ikke kunne give absolutte temperaturer, og kun relative udsving i temperaturen kan derfor anvendes.

3.3.5 Opstilling

Opstillingen er som nævnt placeret på taget af en 5 etagers bygning. Der er en række turbulensforstyrrende objekter på taget, heriblandt to ventilations-skakker fra instituttets laboratorier på etagerne nedenunder. Se figur 3.3 for skitse af taget.

Måleinstrumenter og computer til dataopsamling er placeret sammen med en række andre måleopstillinger fra DMU og RISØ, i et temperaturreguleret rum på 20°C, lige under taget. Direkte over dette rum er målemasten hvori det soniske anemometer, samt indtag til CO₂- og partikelmåling, er placeret. Disse indtag er ført op til masten gennem et mindre rør, der går lige op igennem taget, således at længden af luftindtagene til instrumenterne er minimeret.

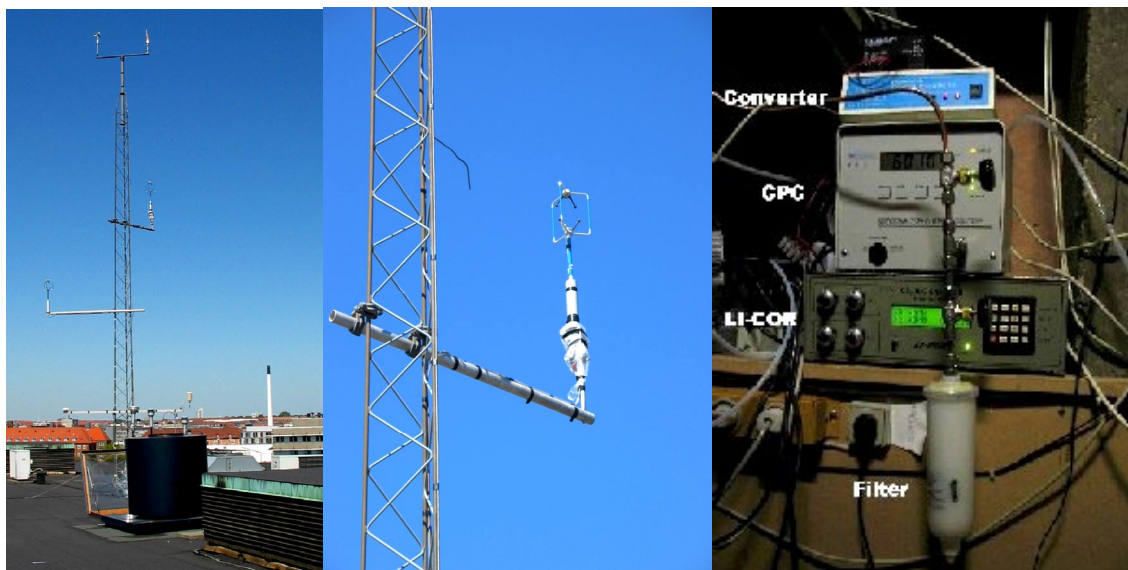
Bommen der holder det soniske anemometer er 1.5m lang og anemometeret er placeret ca. 1m ude fra masten. Bommen er placeret mod nordvest for at minimere antallet af mast-influerede målinger, da den dominerende vindretning er fra sydvest (Roth, 2000).

Anemometeret og indtagene er placeret i masten ca. 8m over taget, hvilket inklusiv bygningshøjde, giver en samlet målehøjde på ca. 28m.

Den laterale afstand mellem partikelindtag og det soniske anemometer er 58cm. Denne afstand skal være stor nok til at indtaget ikke forstyrrer vindmålingerne, og samtidig så kort at koncentrationen kan antages at være den samme ved det soniske anemometer som ved indtag. Typiske afstande ligger på 40-60cm. Moore (1986) anbefaler at sensorseparationen ikke overstiger 10% af z-d under ustabile forhold, hvilket er overholdt i dette forsøg.

Sensor separationen har vist sig at fungere som et filter på data, som der kan korrigeres for. Dette er dog primært et problem ved målehøjder under 5m og stabile forhold (Foken & Wichura, 1996; Nemitz et al., 2002), da jo mindre hvirvlerne er jo større er effekten. Da der måles i 28m og da der sjældent opstår stabile forhold i byen, er det derfor ikke nødvendigt ved dette forsøg. Ifølge Moore (1986) vil kun frekvenser over $0.01 * U$ /sensor separationen blive påvirket af sensor separationen, og denne effekt vil stige eksponentielt mod de høje frekvenser. Da gennemsnitsvindhastigheden i dette forsøg var på 4 m/s og sensorseparationen på 0.6m, resulterer denne teori i, at kun hvirvler med en frekvens over 15 minutter, vil blive påvirket af sensorseparationen.

Opstillingen er sammenlignelig med de opstillinger G. Buzorius et al.. (1997), J. R. Dorsey et al.. (2002) og E. M. Mårtensson et al.. (2003) har benyttet til måling af partikelfluxe i henholdsvis et skovområde, og byområder i Edinburgh og Stockholm.



Figur 3.10 Den anvendte opstilling på taget af HCØ Institutet. Venstre foto: Masten, det anvendte anemometer sidder ca. midt på masten. Midter foto: Zoom af anemometer og indtag. Højre foto: Instrumenteringen i temperaturreguleret rum direkte under masten.

3.4 Databehandling

3.4.1 Opsamlingsfrekvens og midlingsperiode

Rådata er behandlet på 4hz datasæt. Indsamlingsfrekvensen skal være høj nok til at måle de turbulente fluktuationer der er ansvarlige for den dominerende transport af energi og masse. 4 hZ skulle være tilstrækkeligt over by (afsnit 2.5). Rådata opsamles herefter i blokke af 30 minutter. Ved fluxberegninger forudsættes at der er stationaritet i midlingsperioden. Denne forudsætning vil blive sværere at opnå ved lange midlingsperioder.

Berger et al. (2001) fandt via Ogive plots (afsnit 2.5) at en midlingsperiode på 30 minutter var tilstrækkelig til at fange den totalte flux over et skovområde, når målehøjden var på 30m. (Lee, Massman & Law, 2004; Held & Klemm, *in press*). Søgaard og Møller-Jensen (2003) samt Idso et al. (2002) benyttede ligeledes 30 minutters midlingsperioder over byområder. Selvom den optimale metode til bestemmelse af midlingsperioden er via Ogive-spektre, er det tilstrækkeligt at blot anvende en 20-30 minutters periode, hvis målingen foretages indenfor overfladelaget og under ustabile til neutrale forhold (Foken og Wichura, 1996).

3.4.2 Beregning af spektre

Der beregnes spektre på rådata for den vertikale vindkomponent, den resulterende horisontale vindhastighed, og på CO₂- og partikelkoncentrationer.

Spektrene beregnes som FFT i Matlab (program udlånt fra Lise-Lotte Sørensen, Risø, se appendiks 1). Da partikelmålingerne er samlet med 4hZ, trods at CPC maksimalt kan måle med 1hZ, er data omregnet til middelværdier af 4 målinger i Visual Basic. Spektre er herefter beregnet på 1hZ data for partikelkoncentrationerne, og på 4 Hz for CO₂ og vindkomponenter.

Efter beregningen i Matlab eksporteres data til Excel, hvor spektrene afbildes grafisk med logaritmisk skala. Dette er den mest brugte præsentation af spektre, da de dækker et stort interval (Stull, 1988, kap. 8).

For at få mere stabile spektre er flere filer samlet til sekvenser af op til 2½time. Da FFT foretages på perioder med antal målinger som 2^x, er det med 4hZ data og 2½time sekvenser, muligt at lave FFT på op til 2¹⁵ målinger, dvs. 2timer og 16minutter.

For partikelspektrene på 1 Hz kan der maksimalt beregnes på 2¹³ målinger, for 2½times sekvenser.

For at mindske risiko for instationaritet i data er perioderne til spektralanalysen valgt således, at vindretningen er stabil over hele perioden. Perioderne er desuden valgt således at de repræsenterer forskellige vindretninger, for at undersøge om taget har nogen betydning for spektrene.

3.4.3 EdiRe

Størstedelen af databehandlingen er foretaget i programmet EdiRe udarbejdet af Robert Clement fra Edinburgh Universitet.

Programmet er udsendt i 1998, men er stadig under udvikling. Det anvendes primært af micrometeorologer til behandling af fluxberegninger i overfladelaget. Programmet er meget brugervenligt, da man selv definerer typen af input-data, og let kan tilføje nye beregninger, enten vha. præprogrammerede funktioner eller brugerdefinerede.

Inputdata defineres i "raw file format" listen, og alle beregninger defineres i "processing" listen (se appendiks 2 for udskrift. Program og anvendte rawfile- og processing lister er vedlagt specialet på cd).

Da der er anvendt spændingsdelere og filter på partikelkoncentrationen, for at kunne registrere den med det tilgængelige opsamlingsprogram, skal signalet fra CPC multipliceres med 4000.

<i>Omregning af partikelkoncentration fra output</i>
<i>Signal 0-10.000 partikler cm⁻³ giver 0-10 volt output (faktor 1.000)</i>
<i>Filter reducerer med 50% (faktor 2)</i>
<i>Spændingsdelere reducerer 0-10V til 0-5V (faktor 2)</i>

Der er ikke taget højde for tryk og temperatur afhængighed ved beregningen af CO₂ koncentrationer og fluxe. Dette skyldes problemer med bestemmelsen af tryk i LiCor. Til fluxberegningerne er luftens massefylde sat til 1.200 kg m⁻³ (Oke, 1987, appendiks).

3.4.4 Beregning af forsinkelse af signaler

Luftindtaget til LiCor og CPC foregår via henholdsvis en 10m plastik slange og et 10m kobberør, derfor vil registreringen af CO₂ og partikelkoncentrationerne være forskudt fra registreringen af vindhastighederne. For at bestemme en flux er det essentielt at koncentrationer og vindhastigheder er samtidige og forskydelsen mellem de to signaler skal derfor fastsættes.

Vindhastighederne registreres øjeblikkeligt gennem det soniske anemometer, og det er derfor forsinkelsen af indsuget til koncentrations målingerne, der skal bestemmes.

Forsinkelsen betegnes herefter som lagtime. Lagtime kan bestemmes på flere måder, f.eks. ved simpel beregning ud fra information om strømning og dimensioner af rør og slange.

$$Qt = L * \frac{\pi}{4} * d^2 \tag{3.1}$$

$$t/L = \frac{\pi * d^2}{4} * F$$

Q er flowrate, t er lagtime, L er længde af rør/slange, d er diameteren og F er fortyndingsfaktoren.

For partikel-systemet;

$$t/L = \frac{\pi}{4} * \frac{(0,38\text{cm}^2)^2}{(1000\text{cm}^3 / 60\text{s})} * 2$$

$$t/L = 1,36\text{s} / m \Rightarrow$$

$$t_{total} = \underline{\underline{13,6\text{sek}}}$$

For CO₂-systemet;

$$t/L = \frac{\pi}{4} * \frac{(0,6\text{cm}^2)^2}{(6000\text{cm}^3 / 60\text{s})}$$

$$t/L = 0,28\text{s} / m \Rightarrow$$

$$t_{total} = \underline{\underline{2,8\text{sek}}}$$

3.4.4.1 Bestemmelse af lagtime ved maxkorrelations metoden

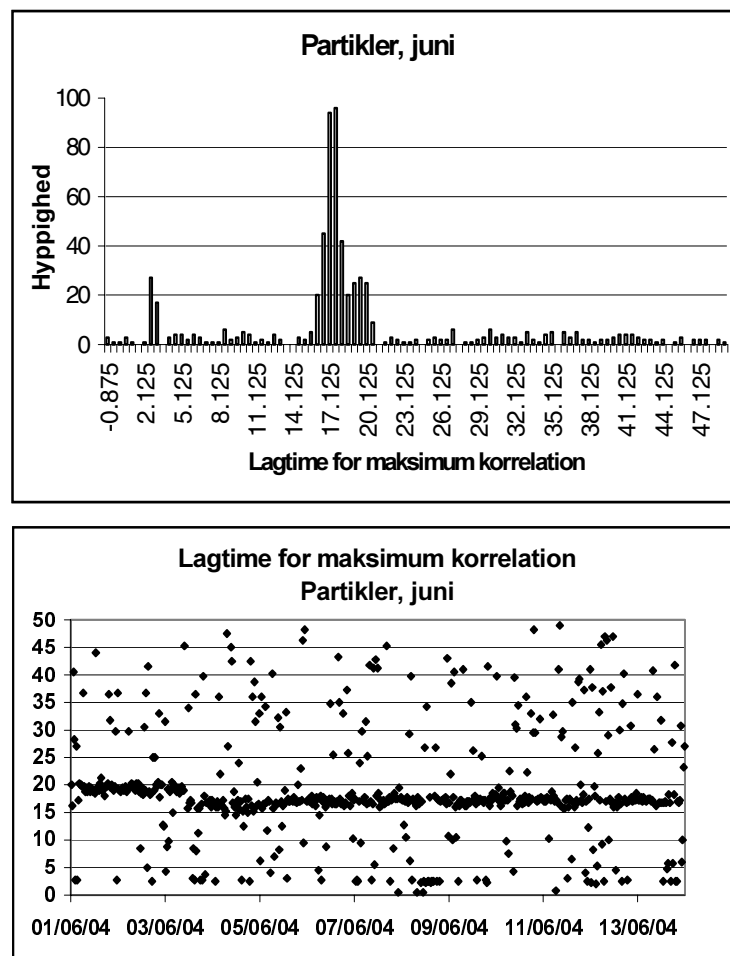
Lagtime kan desuden bestemmes ved maxkorrelationsmetoden, hvor den fastsættes som den forsinkelse der resulterer i den højeste korrelation mellem den vertikale vindkomponent og koncentrationsmålingerne (Buzorius et al., 1998; Held & Klemm, *in press*).

Efter beregning af den teoretiske lagtime, kan denne anvendes til at fastsætte et interval hvor der søges efter maxkorrelationen.

Krydskorrelationen mellem den vertikale vindhastighed og henholdsvis partikel- og CO₂ koncentrationen er her beregnet i EDIRE. Beregningerne er foretaget på 4 Hz data og gennemsnittet for 0.5 sekunders intervaller op til 50 sekunder, for hver halvtimes fil, samt ved hvilken forsinkelse maksimal korrelation forekom.

Histogrammer for tidspunkt for maxkorrelation er udarbejdet for halvtimesfilerne inddelt i måneder. Da tidspunktet for maxkorrelation svingede meget, og gav til tider urealistiske værdier i forhold til beregningen af forsinkelsen, var det nødvendigt at vurdere en ”gennemsnits”værdi samt et interval for forsinkelsen. Dette er gjort på månedsbasis for at tage hensyn til, at den hyppigst forekommende forsinkelse svingede gennem måleperioden. Figur 3.11 viser histogram og x-y plot for partikeldata fra juni måned. Det ses at de hyppigst forekommende lagtime værdier for maksimum korrelation ligger mellem 16 og 20.5 sekunder, med en top ved 17.5 sekunder. Aflæsningerne fra tilsvarende grafer for alle måneder i måleperioden ses i tabel 3.1 (graferne kan ses i appendiks 3). Det ses desuden, at der er et lille spring i lagtimeværdien omkring d 03/06/04. Det er pga. disse små spring, at det er nødvendigt at vurdere data i mindre sekvenser, i stedet for at vælge en fast lagtime for alle data.

Fluxene kan herefter beregnes i EdiRe med den forsinkelse der giver maksimal korrelation for den enkelte halvtimes fil. Hvis denne falder indenfor det specificerede interval, anvendes værdien for den enkelte fil, ellers anvendes den vurderede middelværdi fra tabel 3.1.



Figur 3.11 Histogram for lagtime-værdier for maksimum korrelation mellem w , vertikal vind og partikelantallet for data fra juni, samt plot af de samme lagtime-værdier.

TIMELAG	Maj	Juni	Juli	August	September	December	Januar	Februar
Par, min	18.5	16	17.5	18	20	20.5	19	20.5
Par, max	23	20.5	21	21.5	24	23.5	23.5	25
Par, middel*	22.5	17.5	18.625	20.125	22.5	22.125	21.125	22.5
CO ₂ , min	2	2	5.5	**	**	8.5	9	9
CO ₂ , max	3.5	3.5	8	**	**	12	12	12
CO ₂ , middel*	2.625	2.625	6.625	**	**	11.125	10.625	10.625
* "Middel" er den hyppigst forekommende værdi (aflæst)								
** : Ingen tydelig lag-værdi. Lagtime for maj/juni er benyttet								

Tabel 3.1 Lagtime værdier (sekunder). Aflæst fra grafer over lagtime for maksimal korrelation for alle $\frac{1}{2}$ times filer.

Da krydskorrelationsmetoden er baseret på det målte data, er lagtime bestemt ud fra denne metode at foretrække over beregningen i afsnit 3.4.4. Forskellen mellem lagtime bestemt ved de to metoder, og årsager til svingning i lagtime, kan være vanddamp i CPC og ændringer i partikelstørrelsesfordelingen. Pga. laminar flow i røret (diskuteres i afsnit 3.4.7) vil fordelingen af små og store partikler påvirke hvornår maxkorrelation forekommer.

Den manglende tydelige lagtimeværdi for CO₂ i august-september kan indikere, at fluxene ikke vil være korrekte i denne periode, og muligvis skal frasorteres.

Det ses desuden (tabel 3.1) at lagtime for CO₂ i december-februar afviger meget fra den beregnede lagtime-værdi. Dette kan skyldes at flowet gennem instrumentet i denne periode, ikke var så højt som antaget.

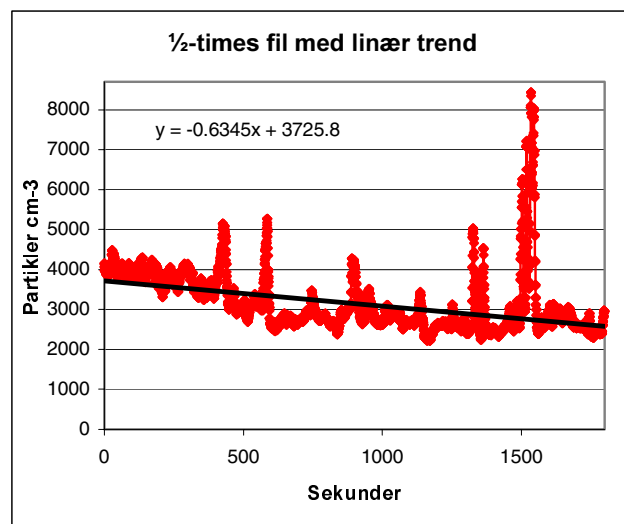
3.4.5 Detrending

CO₂ og partikelkoncentrations målinger er detrendet før beregning af fluxe, for at fjerne effekten af eventuel instationaritet.

Instationaritet kan f.eks. opstå ved et skift i vindretning, hvis vinden svinger fra en retning med én arealanvendelse til en anden. Det kan ligeledes skyldes fejl pga.

nulpunktsforskydning i instrumentet hvilket skal fjernes, og det kan være svært at bedømme, om det skyldes fejl eller et reelt bidrag til fluxen. Der er derfor delte meninger omkring at fjerne variation pga. instationaritet (Lee, Massman & Law, 2004, kap.2).

Det er dog nødvendigt at fjerne trends, hvis kravet til stationaritet i måleperioden skal opfyldes. Detrending kan foretages som linær detrending eller ved at køre et filter over data. Held & Klemm (*in press*) anvendte et filter med 200s glidende gennemsnit for at fjerne lavfrekvente bidrag fra meteorologiske forandringer fra den sande flux. Pryor et al. (*in press*) har derimod valgt linær regression, hvilket også er den valgte detrending metode til data i dette projekt (figur 3.12). Linær detrending vil påvirke spektret, da der fjernes lavfrekvent varians ved at trække trenden i periode fra. Det påvirker derfor primært de lave frekvenser af spektret (Lee, Massman & Law 2004, kap. 2).



Figur 3.12 Uddrag af rådata fil med svag trend i partikelmålingen (8/5-04 kl 15.08-15.38). Denne vil fjernes ved detrending.

Fitreret signal = signal – (offset + hældning * signal)

Der er kørt detrending på koncentrationsmålingerne af partikler og CO₂.

3.4.6 Statistiske beregninger

3.4.6.1 Standardafvigelse og R^2

For at bestemme et mål for spredningen omkring de beregnede ½times middelværdier, beregnes standardafvigelsen i EDIRE ud fra følgende formel;

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (x - \bar{x})^2}{n}} \quad (3.2)$$

hvor \bar{x} er ½times middelværdien, x er de øjeblikkelige målinger og n er antallet af målinger.

Standardafvigelsen anvendes bl.a. som et mål for turbulensen ved angivelse af σ_w (vertikal vind).

For at angive i hvor høj grad en række data kan beskrives udfra en tendenslinie, kan R^2 værdien beregnes. R^2 angiver forholdet mellem covariansen af x og y og produktet af standardafvigelserne på x og y . Værdien ligger mellem 0 og 1, og jo tættere på 1 værdier er, jo bedre beskriver linien de anvendte data.

$$R = \frac{n(\sum XY) - (\sum X)(\sum Y)}{\sqrt{[n\sum X^2 - (\sum X)^2][n\sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (3.3)$$

3.4.6.2 Stationaritets-procent

For at konstatere om instationaritet i de enkelte midlingsperioder kan have påvirket fluxene efter detrending, kan der beregnes en stationaritets-procent (Foken & Wichura, 1996; Held & Klemm, *in press*).

Beregningen foretages ved at inddele 30 minutters perioderne i 6 perioder af 5 minutter (dette interval kan vælges i EDIRE) og sammenligne gennemsnittene for disse 6 flux-beregninger (beregnet med hver deres gennemsnit for 5 minutter) med total flux for 30 minutters perioden. Beregningen giver procentlig afvigelse mellem disse 2.

Formler anvendt i EDIRE til beregning af stationaritetsprocenten:

Standard variansen og covariansen for hver af de 6 del-segmenter beregnes og summeres

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{\sum (x_i^2)}{n_i} - (\bar{x}_j)^2} \quad (3.4)$$

$$\overline{x'y_j} = \sqrt{\frac{\sum x_i y_i}{n_i} - (\bar{x}_j \cdot \bar{y}_j)} \quad (3.5)$$

$$\sigma_{segment} = \frac{\sum \sigma_j}{n_j}$$

$$\overline{x'y'}_{segment} = \frac{\sum x'y'_j}{n_j}$$

Herefter beregnes statistik for hele 30 minutters perioden:

$$\sigma_{30min} = \sqrt{\frac{\sum_j \sum_i (x_{i,j}^2)}{n_i} - (\bar{x}_j)^2}$$

$$\overline{x'y'}_j = \sqrt{\frac{\sum_j \sum_i x_{i,j} y_{i,j}}{j \cdot n_i} - (\overline{x}_{30min} \cdot \overline{y}_{30min})}$$

Sidst beregnes stationaritetens-procenten

$$S_x = 100 \cdot \left| \frac{\sigma_{30min} - \sigma_{segment}}{\sigma_{30min}} \right| \quad (3.6)$$

$$S_{xy} = 100 \cdot \left| \frac{\overline{x'y'}_{30min} - \overline{x'y'}_{segment}}{\overline{x'y'}_{30min}} \right|$$

3.4.7 Dæmpning af partikkelkoncentration og flux i røret

Ved turbulent strømning, strømmer luften gennem kobberrøret i tilfældige bevægelser, og næsten alle partikler kommer i kontakt med siderne. Hastigheden af luften vil her være den samme gennem stort set hele tværsnittet, undtagen helt ude ved siderne, hvor der sker opbremsning.

Ved laminar strømning er hastighedsprofilerne forskellige gennem et tværsnit.

Strømlinierne vil være lige, og ikke hvirvlende, og partikler der bevæger sig midt i røret, vil ikke komme i kontakt med siderne. De vil derfor have højere hastighed end partikler nær siderne og komme hurtigere frem til instrumentet. Dermed vil partiklerne, der suges gennem i midten af røret være f.eks. 18 sekunder undervejs, mens partikler i siderne måske er op til 22 sekunder om at blive suget gennem røret. Alle fluktuationer i koncentrationerne vil dermed udglattes. Da fluxe er beregnet på netop disse fluktuationer, er dette et problem for målingerne (Buzorius, 2001).

Om strømningen i røret er turbulent eller laminar kan bestemmes ved en beregning af Reynolds tal (Re). Ved turbulent strømning er $Re > 4000$, ved laminar er $Re < 2000$ (Hinds, 1999, kap 2)

Reynolds tal (Stull, 1988, kap. 3):

$$\text{Re} = \frac{V \cdot d_{\text{rør}}}{\nu} \quad (3.7)$$

V: luftens hastighed i røret (1l/min gennem instrument, 50% filter=0.5l /min gennem røret)

$d_{\text{rør}}$: rørets diameter, 3.8mm

ν : luftens molekylære viskositet = $0.15 \cdot 10^{-4} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$

Dette udtryk kan reduceres til:

$$\text{Re} = 66000 \cdot V \cdot d \quad (3.8)$$

$$\text{Hvor: } V = \frac{Q}{A}$$

(Hinds, 1999, kap. 2)

For den anvendte opstilling :

$$Q = \frac{0.5 \text{ L} / \text{min} \cdot 0.001 \text{ m}^3 / \text{L}}{60 \text{ s} / \text{min}} = 8.33 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{s}$$

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} = \frac{\pi \cdot 0.0038^2}{4} = 1.134 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

$$\text{Re} = 66.000 \cdot \left(\frac{8.33 \cdot 10^{-6}}{1.134 \cdot 10^{-5}} \right) \cdot 0.0038 = \underline{\underline{184}}$$

Reynolds tal er dermed langt mindre 4000, hvilket medfører at strømmingen kan antages laminar. Dette vil resultere i tab af flux.

For at opretholde Re på 4000 med denne opstilling, skulle flowet gennem røret have været på 10.8 l min^{-1} .

Koncentrationen af partikler kan, som nævnt, også dæmpes i røret ved diffusionstab til siderne. Selvom der er taget hensyn til, at dette minimeres ved brug af kobber-rør, vil der altid tabes partikler pga. diffusion. Et plastik rør ville give større diffusionstab pga. elektrostatiske opladninger på overfladen, der øger adhæsionen.

I forhold til diffusionstab er laminar flow bedre end turbulent, da færre af partiklerne vil komme i kontakt med siderne, og dermed bliver færre små partikler tabt ved adhæsion til siderne.

Hinds (1999, kap. 7) foreslår følgende simple formler til beregning af diffusionstab i et rør ved laminar flow:

$$P = n_{\text{out}}/n_{\text{in}}$$

Hvor n_{in} er den indgående koncentration og n_{out} er den udgående efter diffusionstab.

$$P = 1 - 5.5 \mu^{2/3} + 3.77 \mu \quad \text{for } \mu < 0.009 \quad (3.9)$$

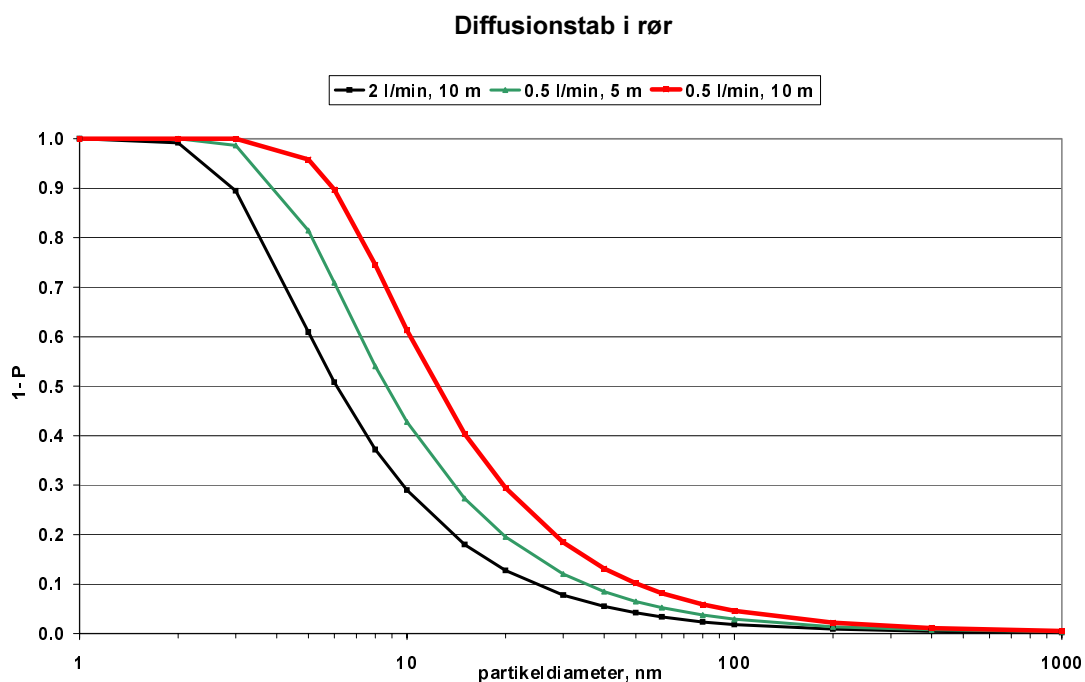
$$P = 0.819 \exp(-11.5 \mu) + 0.0975 \exp(-70.1 \mu) \quad \text{for } \mu \geq 0.009$$

Hvor μ er den dimensionsløse depositionsparameter:

$$\mu = (D L_{\text{rør}}) / Q \quad (3.10)$$

Hvor D er diffusionskoefficienten (se appendix 4), $L_{\text{rør}}$ er længden af røret og Q er volumen flowet i røret.

Figur 3.13 viser diffusionstab i røret ved den anvendte opstilling (10m, 0.5l/min) samt beregninger for tabet ved opstilling med kortere indtag og højere flow i røret. Det ses at jo længere røret er, og jo lavere flowet er, jo flere partikler tabes ved diffusion. Dette skyldes at opholdstiden nær siderne af røret er længere, og der er dermed længere tid til deposition ved diffusion.



Figur 3.13 Diffusionstab i røret beregnet ud fra formel 3.9. Tabet ved den anvendte opstilling er vist med rød kurve.

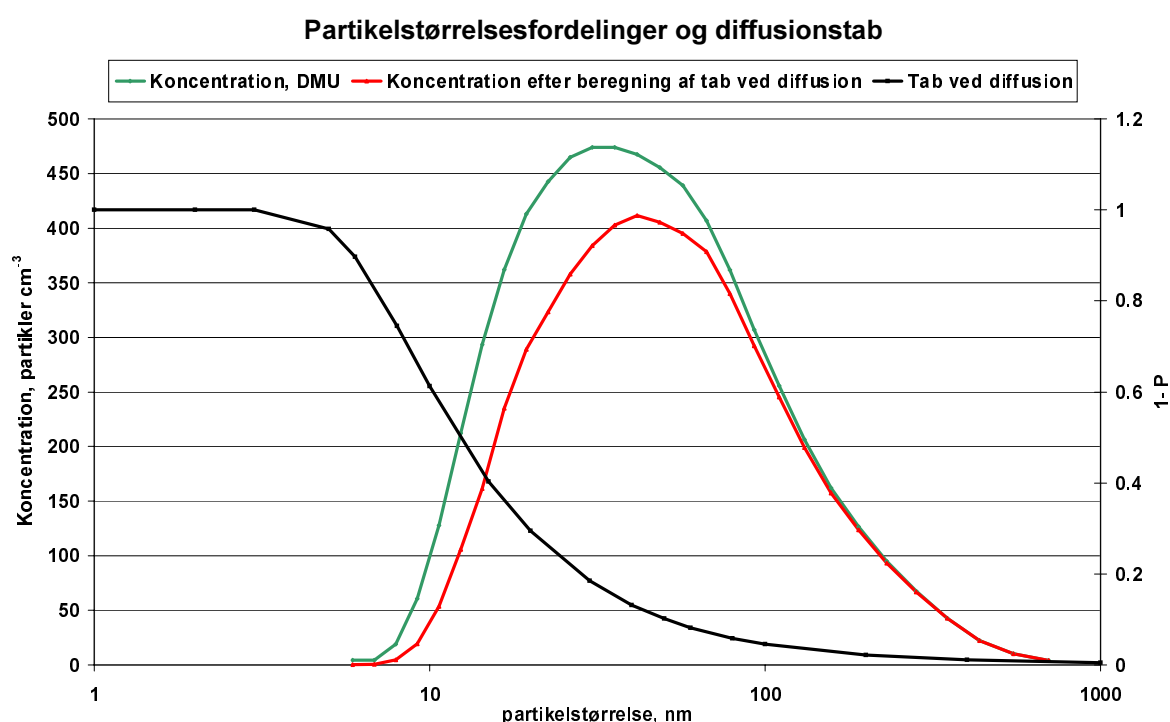
Det er især de mindste partikler der tabes ved diffusion. 95% af alle partikler mindre end 5nm vil blive tabt i røret, mens kun 5% af partikler større end 90nm vil adhædere til rørets sider (figur 3.13).

Ved sammenligning med partikelstørrelsesfordelinger målt af DMU på HCØ, kan det bestemmes hvor stor en del af partiklerne, der tabes i røret.

Det forudsættes her at DMU's partikelkoncentrationer ikke er udsat for tab, og afspejler sande koncentrationer.

Den grønne kurve i figur 3.14 viser en gennemsnits partikelstørrelsesfordeling i partikler cm^{-3} , beregnet ud fra 6607 ½times målinger i perioden 7/5-17/12 2004. I samme figur er vist diffusionstabet fra formel 3.9 og den resulterende kurve for partikelstørrelsesfordelingen, som den ville se ud, målt med 10m indtag og 0.51 min^{-1} flow. Beregningerne viste at målingerne fra indeværende forsøg, i.flg. formel 3.9 og koncentrationsfordelingen fra DMU, i gennemsnit vil tabe ca. 18% af partiklerne i røret ved diffusion (areal mellem rød og grøn kurve i figur 3.14).

Andelen af tabte partikler vil i høj grad afhænge af partikelstørrelsesfordelingen, og dermed svinge gennem døgnet. Jo større andel små partikler, jo mere signifikant er tabet (figur 2.13 og 2.14).



Figur 3.14 Størrelsesfordeling af partikelkoncentrationer fra DMU, diffusionstab (formel 3.9) samt den resulterende partikelkoncentrationsfordeling efter korrektion af diffusionstab.

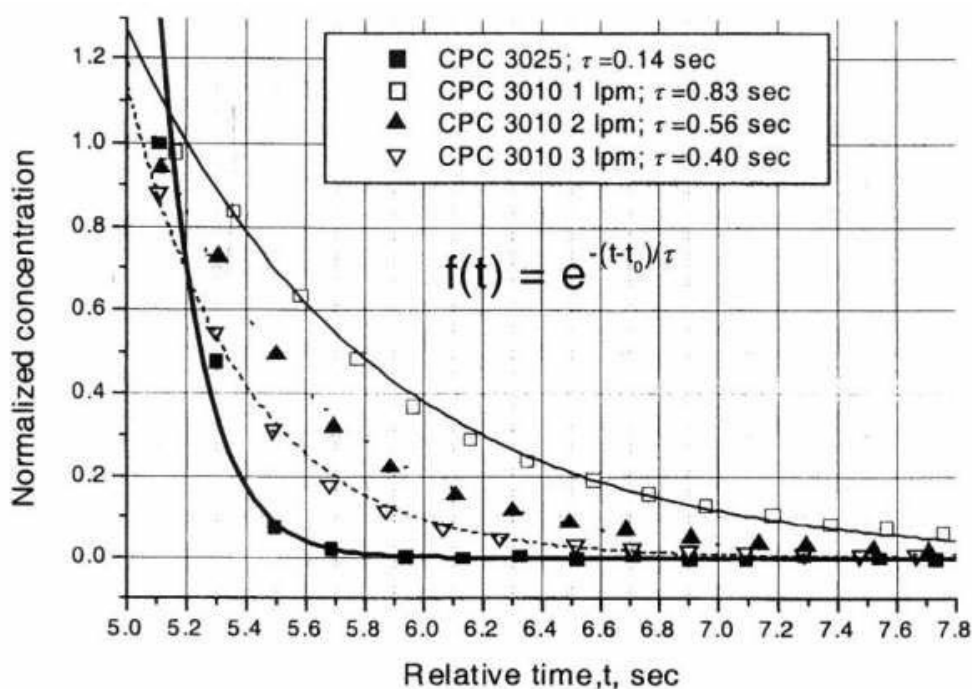
3.4.8 CPC's reaktionstid- Tidskonstanten Tau

Ved anvendelse af en CPC til fluxmålinger er den kritiske faktor reaktionstiden i instrumentet. Andre problemer med CPC kan være detektionseffektiviteten og den mindste detekterbare partikelstørrelse. Disse er især afhængige af temperaturforskellen mellem mætnings- og detektionskammeret, samt størrelsen af flowet i instrumentet (Buzorius, 2001).

CPC har, som beskrevet, en reel reaktionstid på ca. 1 Hz, hvilket betyder at al varians med en frekvens højere end dette, ikke vil bidrage til den målte flux, og bidrag fra de små højfrekvente hvirvler måles derfor ikke (Horst, 1997).

Den præcise reaktionstid kaldes tidskonstanten, og er defineret som den kortest mulige tid, det vil tage at ændre målingen af koncentrationen. TSI Instruments opgiver instrumentets reaktionstid til under 5 sekunder for en registrering af 95% af koncentrationsændringen. Reaktionstiden for det samlede system vil dog være væsentlig længere, da den inkluderer den tid, det tager luftprøven at komme fra indtaget og til instrumentet.

Tidskonstanten for instrumentet kan bestemmes eksperimentelt, og er målt af Buzorius (2001) til 0.83 sekunder for en CPC 3010 med en flowrate på 1 l/s (figur 3.15).



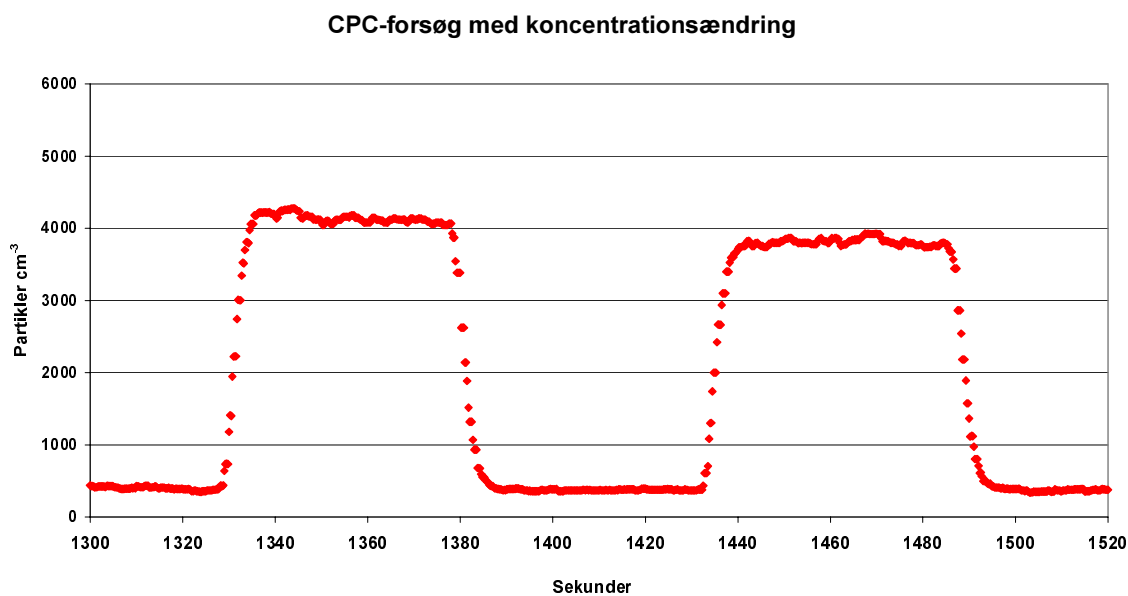
Figur 3.15 Reaktionstiden τ for CPC 3010 ved forskellige flow gennem instrumentet (Buzorius, 2001)

I dette forsøg er anvendt filter på 50% (beskrevet i afsnit 3.2.1.5), og det kan forventes at tidskonstanten for dette forsøg vil være længere end de 0.8 sek., da koncentrationsændringerne er dæmpet af dette.

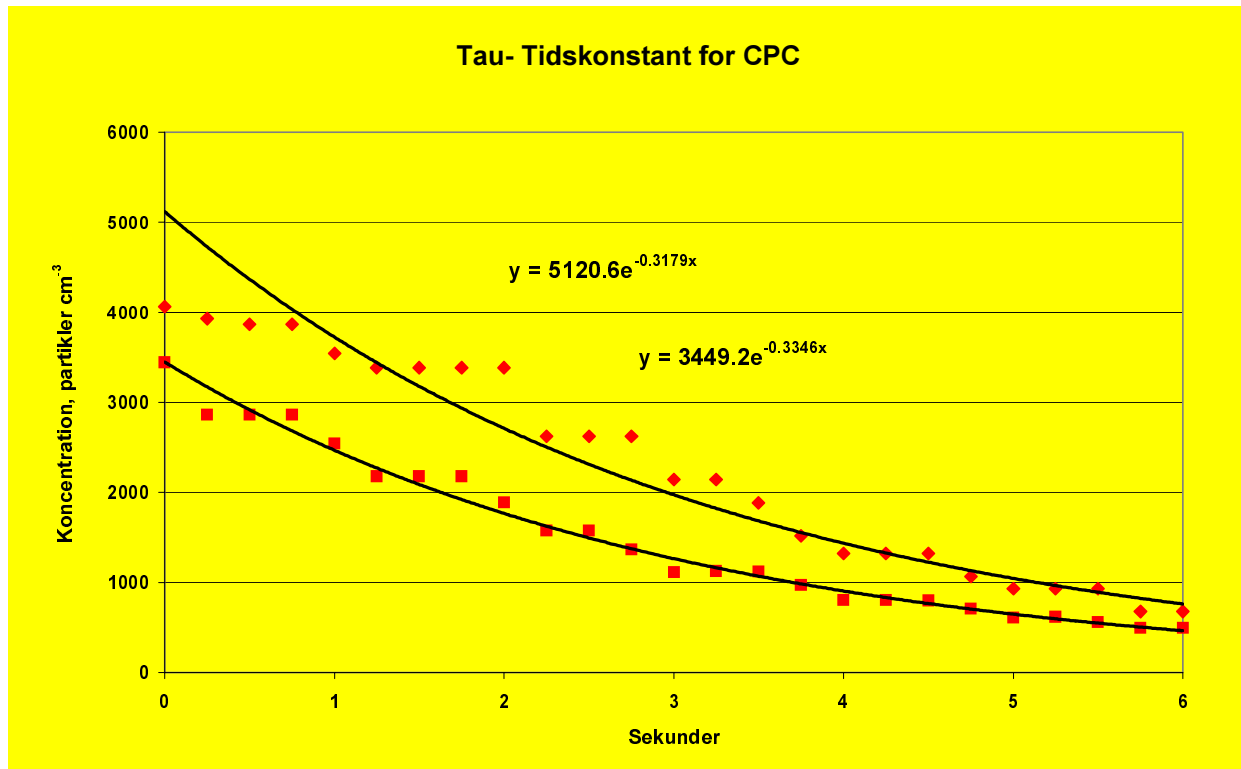
Tidskonstanten beregnes ud fra følgende formel for forholdet mellem målte (output) og faktiske (input) koncentrationer (Buzorius, 2001):

$$\frac{c_{output}}{c_{input}} = \exp\left(\frac{-t}{\tau}\right) \quad (3.11)$$

For at bestemme tidskonstanten blev opstillingen testet ved indendørs forsøg. Forsøget blev foretaget ved at montere et ekstra filter ved indtaget af det 10 m lange kobberrør, og veksle mellem filtreret luft og omgivende luft (Held og Klemm, *in press*). Hvad der burde være et øjeblikkeligt skift mellem de to koncentrationer, vil resultere i en kurve, hvor Tau kan aflæses ud fra tilnærmelsen til kurven. Tidskonstanten er beregnet for to perioder med koncentrationsændringer (benævnt a og b). Det blev aflæst i figur 3.16 at en koncentrationsændring tog ca. 6 sek., og perioderne omkring ændringerne blev herefter udvalgt. Figur 3.17 viser de to 6 sekunders perioder og de eksponentielle kurver.



Figur 3.16 Udsnit af graf fra forsøg til bestemmelse af tidskonstanten tau. Koncentrationsændringerne blev konstrueret med påsat filter, og to perioder blev valgt til beregning af tau.



Figur 3.17 Udfra figur 3.16 ses det at koncentrationsændringen tager ca. 6 sek. Disse perioder omkring koncentrationsændringerne er her afbildet med de eksponentielle tilnærmelser til kurverne, således at Tau kan aflæses. Det ses desuden af CPC måler med ca. 1Hz, men ikke præcist, og ikke de 4 Hz signalet er opsamlet med.

Tau kan herefter beregnes:

$$1/\tau_a = 0,3346$$

$$1/\tau_b = 0,3179$$

$$\tau_{\text{gennemsnit}} = 3.07$$

Forsinkelsen i røret blev undersøgt ved at registrere tiden mellem påsætning af filter, og det begyndende fald i koncentrationsmålingerne. Dette bekræftede en forsinkelse på ca. 20 sekunder, som bestemt ved maxkorrelations-metoden (afsnit 3.4.4.1).

3.4.9 Korrektion for dæmpning af partikelflux

Den flux der måles vil være påvirket af sensorens reaktionstid, sensor separationen, målehøjden, vindhastigheden og stabiliteten i atmosfæren.

Det er især ved de høje frekvenser, der tabes flux i målingerne. For at korrigere på den tabte flux pga. den relativt langsomme sensor i forhold til frekvensfordelingen af spektret kan Horst's (1997) formel anvendes (Buzorius, 2001; Held og Klemm, *in press*; Pryor, *in press*).

Horst's korrektioner tager ikke hensyn til sensor separationen, som ligeledes vil påvirke de høje frekvenser af spektret.

Størrelsen af underestimeringen af den målte partikelflux vil afhænge af CPC's reaktionstid, og af frekvensfordelingen af hvirvlerne der bidrager til fluxen (Horst, 1997). For at anvende Horst's ligning til korrektion er det nødvendigt at kende tidskonstanten, og at toppen af spektret antages at være afhængig af stabilitetsfaktoren z/L (Horst, 1997).

Horst's (1997) formel for korrektion af flux (målt flux/ faktisk flux):

$$\frac{F_m}{F} = \frac{1}{1 + \left(2\pi n_m \tau_c \frac{\bar{u}}{z} \right)^\alpha} \quad (3.12)$$

For ustabile og neutrale forhold, $z/L \leq 0$:

$$n_m = 0.085 \text{ og } \alpha = 7/8$$

For stabile forhold, $z/L > 0$:

$$\alpha = -1$$

$$n_m = 2.0 - \frac{1.915}{\left(\frac{1 + 0.5z}{L} \right)} \quad (3.13)$$

n_m er afhængig af stabilitetsfaktoren z/L og er et udtryk for toppen af cospektret for vertikal vind og den målte scalar, bestemt ud fra Kaimal's ligninger.

Horst's formel vil blive anvendt i resultatbehandlingen til vurdering af tabet af flux i afsnit 4.6.2.

4 Resultater og diskussion

Dette afsnit er indledt med en undersøgelse af rådata, samt analyse af spektre for rådata. Der er her lagt vægt på at konstatere hvilke målinger der er anvendelige i den videre analyse. Det understreges, at der er taget hensyn til, at analysen skal konstatere om metoden er brugbar, og dermed ikke beskrive enkeltstående hændelser, men gennemsnitsbetragtninger.

Herefter vil det undersøges hvorledes turbulensen er påvirket af taget.

CO₂- og partikelkoncentrationer og fluxe præsenteres ud fra døgnvariationen, for at undersøge om de følger variationen i trafikken, der har en markant svingning gennem døgnet, samt for årstidsvariationen for at konstatere om vejrforhold påvirker variationen i de to parametre.

For at konstatere i hvor høj grad CO₂ og partikel fluxene kan relateres til deres hovedkilde, trafikken, er der opstillet en simpel analyse af denne relation. Herefter undersøges fluxene og koncentrationernes variation med vindretningen, for at se om der kan anes en forskel i kildeområde.

Sidst vil det undersøges hvor meget partikelfluxene er dæmpet af den valgte opstilling og instrumentering, og hvorledes dette kan udbedres ved fremtidige målinger.

4.1 Rådata

Data fra indeværende forsøg er koblet med data fra DMU i databaseprogrammet ACCESS. Målingerne fra begge datasæt er midlet over ½time, men tidspunkterne for målingerne kan være op til 15min forskudt.

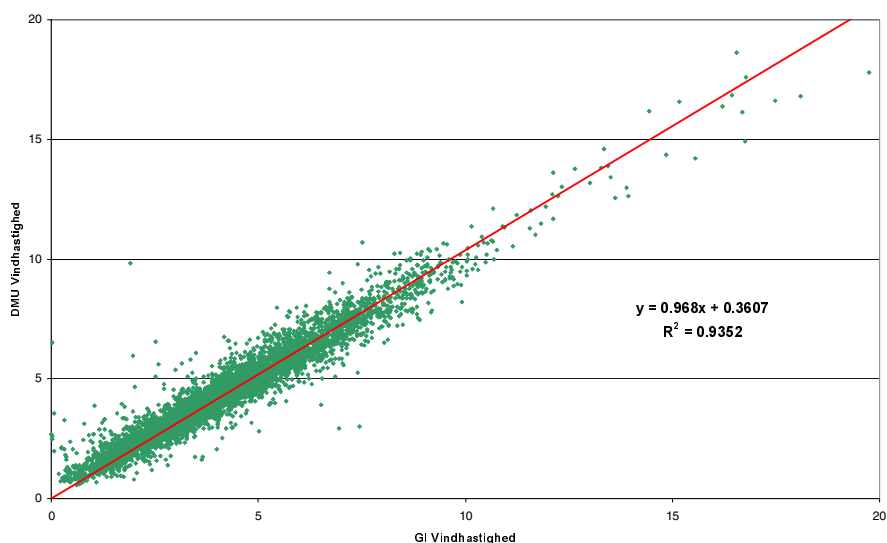
Målingerne fra indeværende forsøg benævnes herefter GI (Geografisk Institut) målingerne. Rådata fra GI målingerne er vedlagt specialet på cd.

4.1.1 Vindmålinger

Målingerne fra det soniske anemometer er sammenlignet med DMU's samtidige målinger foretaget med et kopanemometer fra toppen af masten på HCØ.

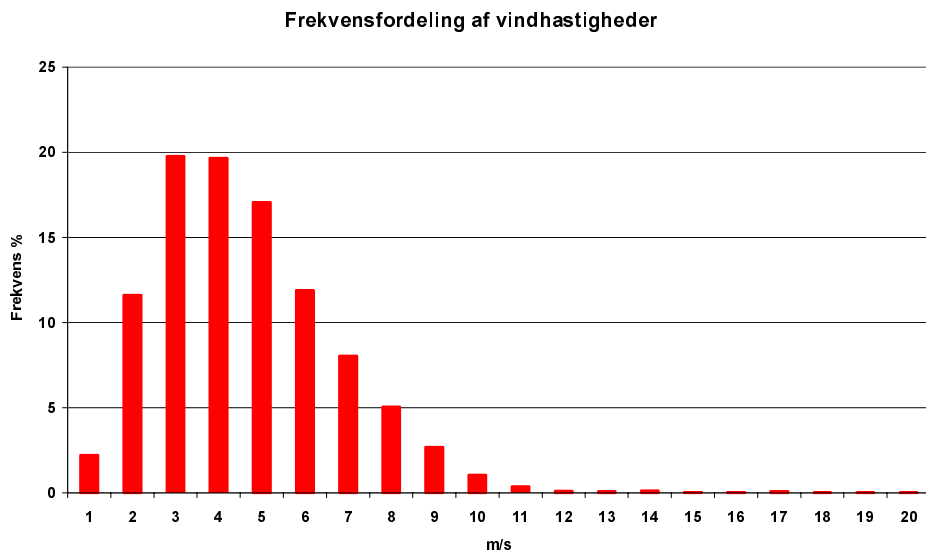
Vindmålingerne fra det soniske anemometer er beregnet som den resulterende vektor, og giver derfor en hastighed, der er sammenlignelig med resultatet fra kopanemometeret. Der kan dog forventes mindre afvigelser pga. forskellen i målemetode, måletidspunkt samt forskellen i målehøjde på 2m.

Data for både vindhastigheder og retninger er udpræget sammenfaldende, og målingerne fra det soniske anemometer antages at være pålidelige. Ved sammenligning af alle målinger af vindhastigheden, uden frasorteringer, viste det at de to datasæt korrelerer med en R² værdi på 0.94 (figur 4.1)



Figur 4.1 Sammenligning af vindhastighedsmålinger fra DMU's kopanemometer med GI's soniske anemometer.

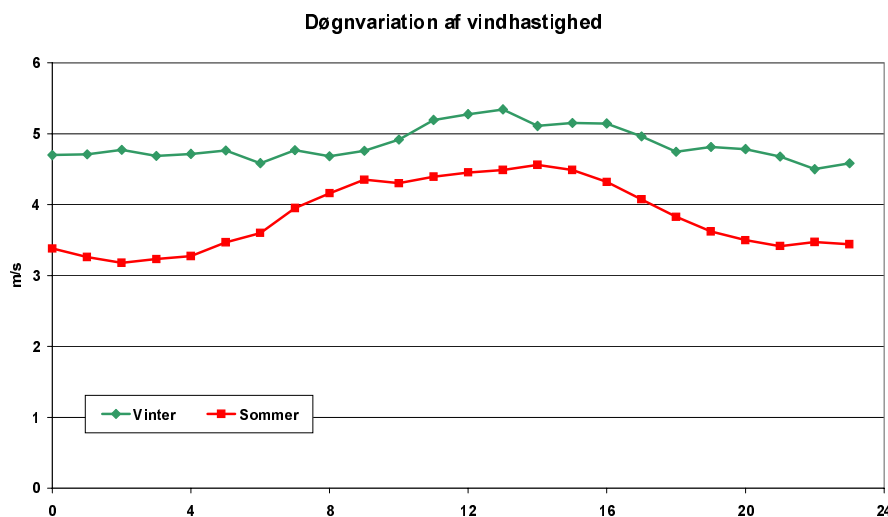
Frekvensfordelingen (figur 4.2) af alle vindhastighedsmålingerne viste at ca. 40% af observationerne er foretaget under vindhastigheder på $3-5 \text{ m s}^{-1}$. Vindhastigheder over 13 m s^{-1} stammer primært fra orkanen d. 8/1-2005, hvor vindhastighederne var op til 20 m s^{-1} . Døgn gennemsnittet for alle målingerne ligger mellem 3.6 m s^{-1} kl. 02 og 4.7 m s^{-1} kl. 12. Gennemsnitlig forskel mellem dag og nat er ca. 10%.



Figur 4.2 Frekvensfordelingen af alle målinger (6163 målinger).

Figur 4.3 viser døgnvariationen i vindhastighed fordelt på sommerperioden (maj-september) og vinterperioden (januar-februar). I dagtimerne (kl.06-kl.18) ligger den

gennemsnitlige vindhastighed for vinterperioden ca. 40% over vindhastigheden for sommerperioden, og i nattetimerne ca. 20% over vindhastigheden for sommerperioden. Se figur 3.6 for frekvensfordeling af vindretninger samt vindhastigheder ift. vindretning.

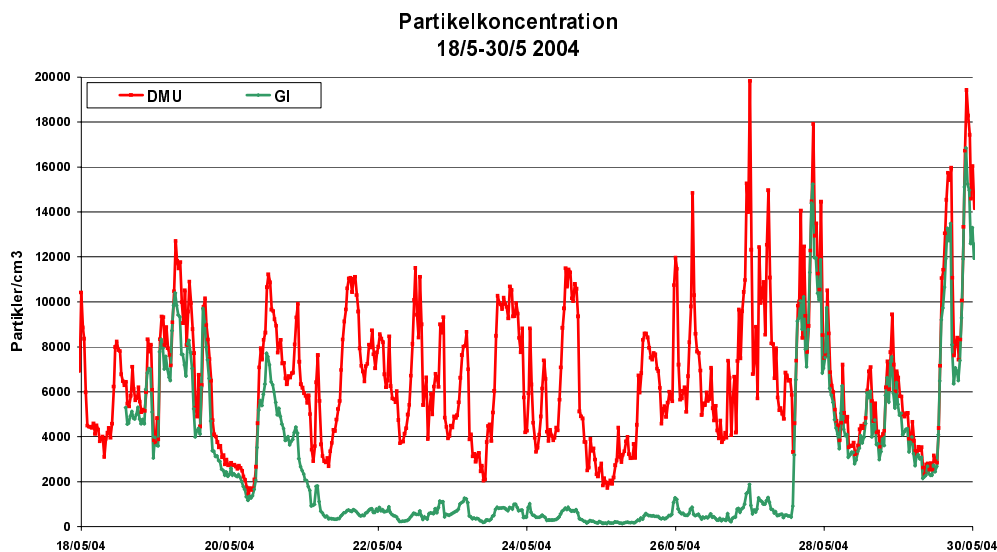


Figur 4.3 Vindhastigheden er vist for sommer- (maj-september) og vinterperiode (januar-februar). Målinger under orkanen d 8/1-'05 er frasorteret.

4.1.2 Partikelmålinger

DMU har foretaget partikelmålinger fra HCØ med en SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer), der måler antallet af partikler i størrelses intervaller (se eventuelt figur 2.13 og 2.14 for grafer over partikelstørrelsesfordelingen). Indtaget til instrumentet var umiddelbart over taghøjde.

Da DMU's SMPS system måler på samme minimum partikelstørrelse som CPC 3010, kan de summerede antal partikler fra samtlige størrelsesinddelinger, sammenlignes med resultater fra GI. Desværre overlapper DMU's målinger kun måleperioderne for dette forsøg i kortere intervaller (se appendiks 5), da begge systemer i perioder var til reparation. Det er tydeligt at se sammenlignelige udslag i de to målinger, dog ikke altid af samme størrelse, samt at der er udfald i CPC 3010, der har resulteret i fejlmålinger (figur 4.4). Da partikelkoncentrationer svinger meget, og i perioder er utroligt lave selv i byområder, er data sammenholdt med partikelkoncentrationsmålingerne fra DMU på månedsbasis, for at konstatere om denne opstilling viser samme lave niveau (se figur 4.4 for eksempel på periode med meget lave partikelmålinger). Det er her konstateret, at GI systemet har vist fejlmålinger i visse perioder, og data herfra slettes fra videre databehandling.



Figur 4.4 Sammenligning af data for partikelkoncentrationer fra DMU's SMPS system og GI-opstillingen. Udsnit af data. Det ses, at der i perioden d 20-27/5-04 er data fra GI opstillingen hvor koncentrationerne falder til et usædvanligt lavt og stabilt niveau, samt at de to kurver ellers følger hinanden med kun små afvigelser i udsvingene.

Disse fejlmålinger ses tydeligt på figur 4.5 som partikelkoncentrationer på under 1000 partikler cm^{-3} . Frasorteres disse målinger, er der en korrelation mellem GI og DMU målinger med en R^2 faktor på 0.74. Det ses ud fra tendenslinien at DMU's målinger i gennemsnit ligger ca. 7% højere end GI's, hvilket er mindre end forventet ud fra analysen af diffusionstab i røret (afsnit 3.4.7).

Den mest sandsynlige årsag til fejlmålingerne er vanddamp i instrumentet, hvilket var årsag til flere instrumentnedtagninger gennem måleperioden.

Der er frasorteret koncentrationer pga. fejlmålinger fra perioderne;

20/5- 27/5 2004

26/8- 9/9

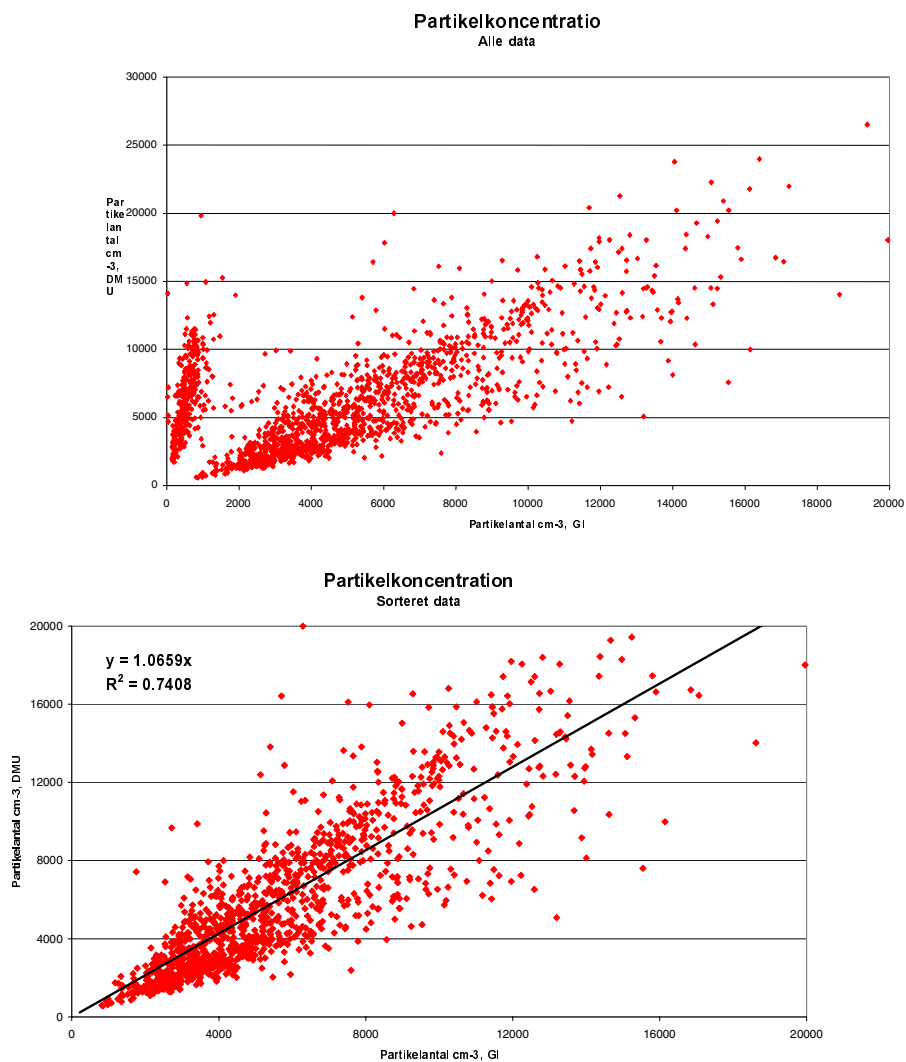
22/12- 23/12

25/12

7/1-9/1 2005, muligvis pga. orkanen.

30/1-18-2

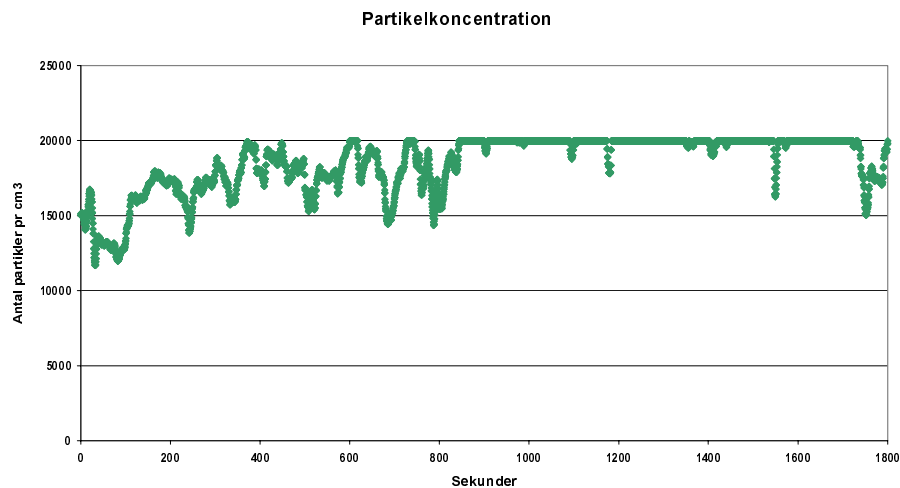
Partikelkoncentrationer beregnet på ½times midlingsperioder med over 40% standard afvigelse (1136 observationer, svarende til 18,4% af det fulde datasæt) er desuden frasorteret, da de anses for at indeholde kraftige udsving, eller instationaritet (forudsætning ved eddykorrelation, se afsnit 2.5).



Figur 4.5 Sammenligning af målinger af partikelkoncentration fra DMU's SMPS system og GI's opstilling. Øverst: Alle data. Nederst: Fejlmålinger frasorteret.

Da partikelkoncentrationerne svinger meget kraftigt, vil stationaritetsprocenten ofte være meget høj. Det var derfor nødvendigt at anvende en forholdsvis høj stationaritetsprocent, for ikke at udelukke en stor del af målingerne. Der er valgt at fjerne data med en stationaritetsprocent på over 100% efter detrending (628 målinger, 9.8%).

Det er konstateret, at for perioder med middelkoncentrationer på over 17.000 partikler cm^{-3} , er koncentrationen i en del af måleperioden kommet op på maksimal værdi, 20.000 partikler cm^{-3} , og derfor ikke beregnet korrekt (25 observationer, 0.5%). Dette er desuden bekræftet, ved at undersøge hvilke målinger der indeholder registreringer af maks-værdien. Der er tabt en del af udsvingene og dermed variansen i disse filer, da koncentrationen er blevet registreret som 20.000 partikler cm^{-3} , hvis den faktiske værdi ligger herover (figur 4.6). Derfor vil målingerne ikke være velegnet til fluxberegninger, og de er frasorteret ved disse beregninger. Ved beregninger af gennemsnitskoncentrationer anvendes målingerne dog stadig, da koncentrationerne ellers vil blive yderligere undervurderet.



Figur 4.6 Måling fra 2/6 2004 kl. 12.06-12.36. Målingen gav en middelmåling på 18.516 partikler cm^{-3} , men da koncentrationerne i del af måleperioden er højere end 20.000 partikler/ cm^3 , er målingen frasorteret ved analysen af partikelflux.

Da nogle af målingerne falder ind under flere kriterier, er det samlede antal slettede partikelkoncentrationsmålinger 2628 $\frac{1}{2}$ times filer (42,6% af det samlede datasæt).

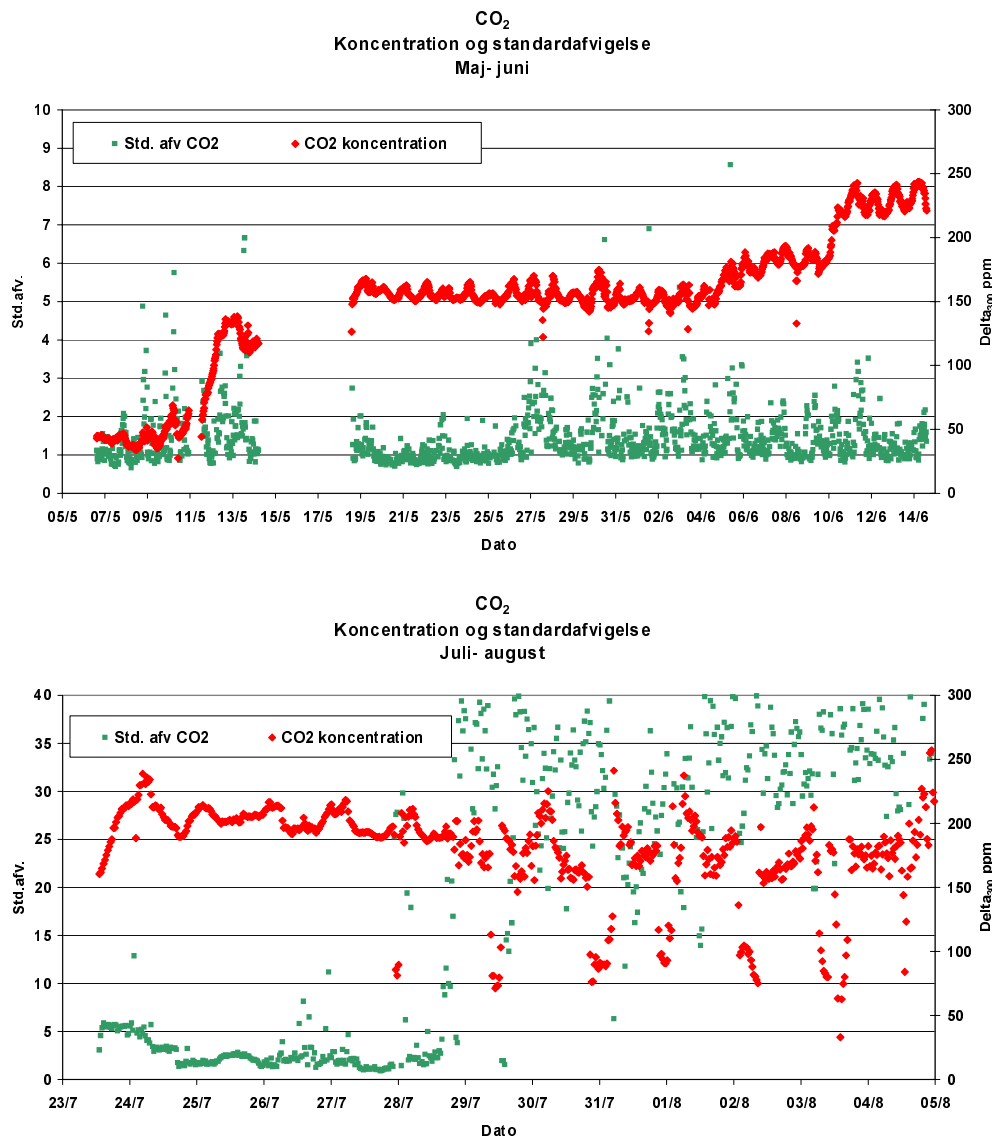
Se appendiks 5 for grafer over alle partikelmålinger fra GI opstillingen og DMU's målinger, samt figur 3.7 for kalender over anvendte måleperioder.

4.1.3 CO₂ målinger

Ved studie af CO₂ målingerne er det tydeligt at der er perioder hvor instrumentet har haft nulpunktsforskydning eller har vist fejlmålinger. Målingerne udviser store spring i koncentrationerne, og ligger til tider på over 500ppm, og data kan derfor ikke antages at reflektere sande koncentrationsmålinger. Alle målinger foretaget under sådanne spring i koncentrationerne frasorteres. På figur 4.7 ses et udsnit at data fra maj-juni 2004, hvor koncentrationsmålingerne springer. Her er data fra perioden 10-12/5 og 9-10/6 slettet. Data fra perioder hvor koncentrationen ligger stabilt kan anvendes til flux beregningerne. CO₂ koncentrationerne vil af denne årsag, angives som afvigelsen fra 300ppm (Delta₃₀₀ ppm) og ikke som sande værdier.

Ud fra visuel vurdering af standardafvigelserne på CO₂ koncentrationsmålingerne er det konstateret, at perioderne 23-24/7 og 28/7-24/9 er behæftet med fejl og frasorteres (figur 4.7) (2077 observationer, 34% af datasættet).

Perioderne havde ingen tydelig lagtime (afsnit 3.4.4.1), hvilket indikerer at der er fejl i målingerne. Dette bekræftes ved, at standardafvigelserne på $\frac{1}{2}$ times middelværdierne ligger mellem 10 og 140ppm i denne periode, hvilket er væsentlig højere end for resten af datasættet. 94% af $\frac{1}{2}$ times målingerne har standardafvigelser på under 5ppm.



Figur 4.7 CO₂koncentrationer og standardafvigelser på ½times målingerne. Øverst: Udsnit fra maj-juni hvor der ses koncentrationsspring d.10-12/5 og 9-10/6, sandsynligvis pga. nulpunktsforskydning i instrumentet. Nederst: Udsnit fra juli-august hvor der ses overgang fra stabil måleperiode til periode med høje standardafvigelser og støj i data. Bemærk: ændret skala for standardafvigelserne.

For at fjerne alle målinger foretaget under kraftig instationaritet frasorteres værdier med stationaritets-procent over 50. Dette kan være målinger, der er midlet over perioder med instationaritet, evt. pga. svingende vindretning, og resulterer derfor i en misvisende fluxberegning. Stationaritetsprocenten er her lavere end for partikkelkoncentrationerne, da CO₂ er en mere stabil parameter, med høje baggrunds niveauer. Der fjernes yderligere 584 målinger pga. stationaritetsprocenter over 50.

I alt fjernes 2954 koncentrationsmålinger, svarende til 48% af det samlede datasæt.

Se appendiks 6 for grafer over alle CO₂ målinger.

4.2 Spektralanalyse

Der er beregnet spektre for udvalgte perioder (se tabel 4.1). For at kunne bedømme turbulenseffekten fra taget i spektrene, blev vindretninger omkring 90 grader, 180 grader og 240 grader valgt, da de beskriver forskellige afstande til forhindringer på taget og til kanten (se figur 3.3).

For at kunne beregne spektre over en periode på op til 2½time, var det nødvendigt at vælge perioder med stationær vindretning. Dette betød desværre, at det ikke var muligt at vælge målinger fra forskellige retninger med ensartet vindhastigheder. F.eks. var vindhastighederne høje i den sydvestlige retning, og det var ikke muligt at finde en måling med stationær vindretning og lav vindhastighed herfra. Det var, af samme årsag, heller ikke muligt at beregne spektre på længere sekvenser end 2^{15} målinger, svarende til 136 minutter.

Spektrene for 136 minutters perioder viste sig som forventet at bedre defineret i den lavfrekvente del, end 68 minutters spektrene. Det så ikke ud til at den længere periode og dermed større varians, påvirkede spektret, og det blev derfor valgt at anvende 136 minutters spektrene, hvor muligt (appendiks 7 viser eksempler på plot af 17 min og 136 min spektre for at vise effekten af en længere datasekvens).

	<i>Dato og tidspunkt</i>	<i>Vindretning</i>	<i>Vindhastighed</i>
<i>2¹⁴- 68 min. spektre (2¹³ for partikler)</i>	<i>12-5-04 kl. 11.32-12.40</i>	<i>180 grader</i>	<i>3.7 m/s</i>
	<i>13-5-04 kl. 11.32-12.40</i>	<i>70 grader</i>	<i>3.4 m/s</i>
	<i>13-5-04 kl. 15.32-16.40</i>	<i>190 grader</i>	<i>3.8 m/s</i>
	<i>31-5-04 kl. 12.36-13.44</i>	<i>95 grader</i>	<i>5.0 m/s</i>
	<i>14-6-04 kl. 11.18-12.26</i>	<i>258 grader</i>	<i>7.2 m/s</i>
	<i>20-1-05 kl. 12.29-13.37</i>	<i>260 grader</i>	<i>9.5 m/s</i>
<i>2¹⁵- 136 min. spektre (2¹³ for partikler)</i>	<i>12-5-04 kl. 11.32-13.48</i>	<i>180 grader</i>	<i>3.7 m/s</i>
	<i>31-5-04 kl. 12.36-14.52</i>	<i>95 grader</i>	<i>5.0 m/s</i>
	<i>20-1-05 kl. 12.29-14.45</i>	<i>260 grader</i>	<i>9.5 m/s</i>

Tabel 4.1 Længde, tidspunkt, vindretning og vindhastighed for perioder, der er beregnet spektre for.

4.2.1 U og W spektre

For at punktmålinger kan anvendes til målinger af hvirvlerne i atmosfæren, og konklusioner herom ud fra spektre, skal Taylors hypotese være gældende. Dette undersøges ved at standardafvigelsen på middelvinden skal være mindre end 0.5 gange middelvinden (Stull, 1988, kap.1). For indeværende datasæt er Taylors hypotese gældende for 95% af alle målingerne, og for 99.2 % af målingerne foretaget under vindhastigheder større end 3m/s.

Figur 4.8 viser spektret for den vertikale vindkomponent, w, og den resulterende horisontale vindhastighed, U.

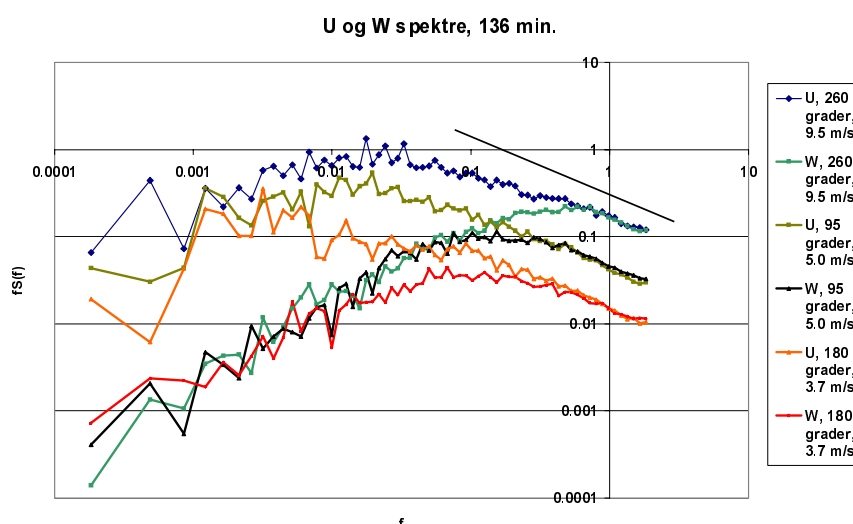
Spektrene følger det forventede mønster (afsnit 2.2). Jo højere vindhastigheden er, jo længere rykker toppen af både U og W spektret opad og mod højre, svarende til øget

energi og større andel af små højfrekvente hvirvler. Også forskellen mellem W og U spektret er som forventet, med højere værdier i U og større lavfrekvent maksimalt bidrag til energien, end i W.

Tabel 4.2 viser placeringen af toppunktet af spektret i forhold til vindhastigheden. Hvis Taylors hypotese forudsættes, viser dette at hvirvlerne, der bidrager mest til energien har en størrelse af ca. 475-1100m i horisontal udstrækning, og 24-40 m i vertikal udstrækning. Toppen af spektret indikerer dermed den størrelse af hvirvler, der bidrager med mest energi, og disse er gennemsnitligt en del højere end bygningerne. Hvirvlerne kan dermed muligvis være dannet af ruheden skabt af afstanden mellem bygningerne, snarere end af højden. Toppen af spektret er dog ikke veldefineret, og aflæsningen er derfor et skøn.

Et andet forventet mønster, der ses i figur 4.8, er hældningen af spektrene i inertiområdet der følger Kolmogorovs teori på $-2/3$. Her er spektret kun afhængig af nedbrydelsen af hvirvlerne, og U og W følger samme mønster.

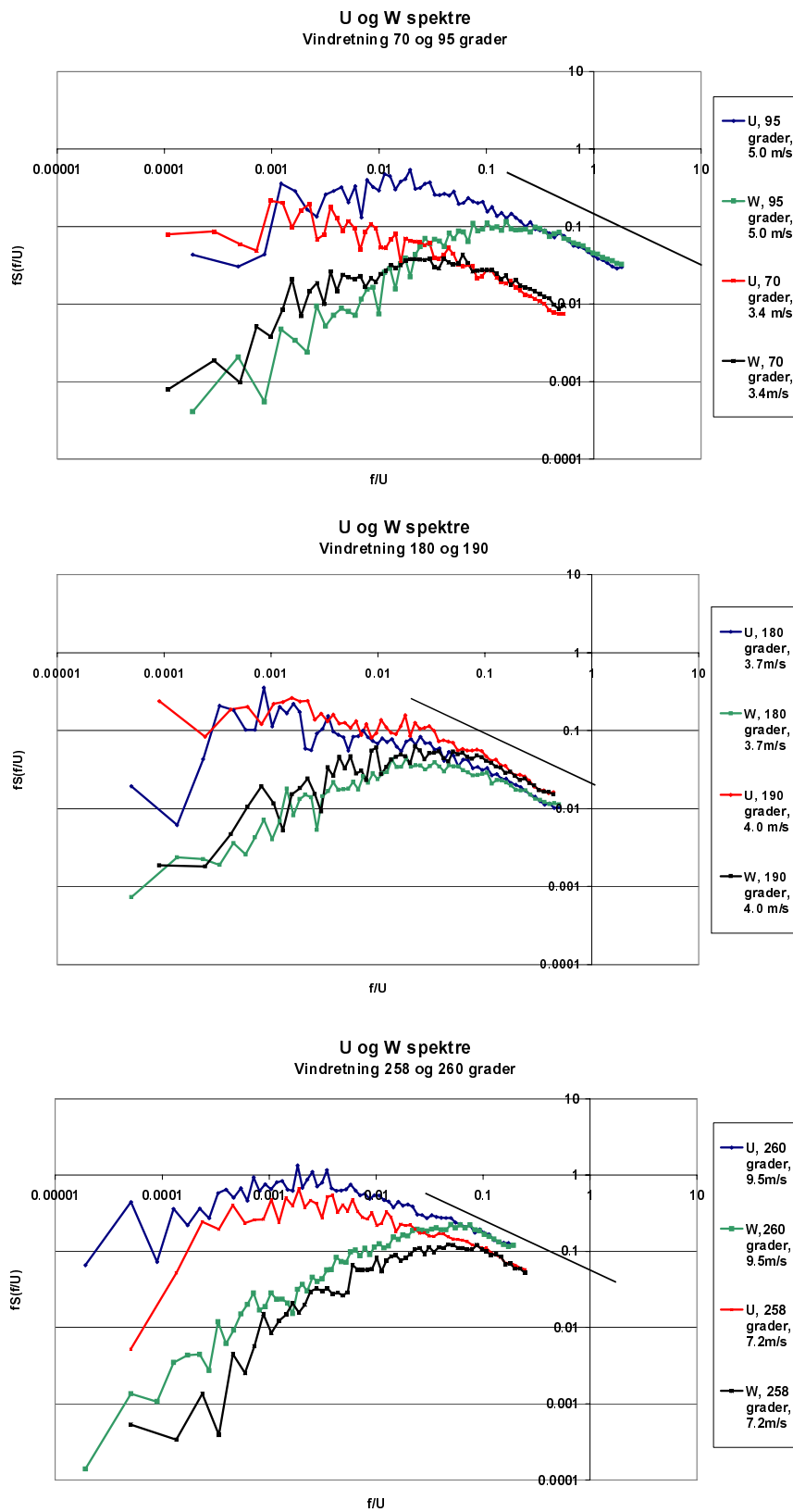
W kurverne ligger meget ens i den lavfrekvente ende af spektret. Dette indikerer at ved frekvenser over ca. 100 sekunder styres størrelsen af hvirvlerne af større fænomener end den lokale vindhastighed. For U spektret nærmer kurverne sig hinanden ved 1000 sekunder, men det er svært at bedømme, da der her er meget stor usikkerhed på punkterne. For at undersøge turbulens-effekten af taget yderligere, er effekten af vindhastigheden på placeringen af toppen af spektret fjernet, ved at normalisere frekvensen med vindhastigheden (Roth, 2000). Figur 4.9 viser spektrene fordelt på de 3 grupper af vindretninger: 70 og 95 grader, 180 og 190 grader og 258 og 260 grader.



Figur 4.8 Spektre for U og w for målinger under forskellige vindhastighed- og retning.

Middel vindhastighed	9.5 m/s	5.0 m/s	3.7 m/s
Vindretning	260 grader	95 grader	180 grader
U spektre, frekvens v. toppunkt	Ca. 50 sek.	Ca. 100 sek.	Ca. 300 sek.
W spektre, frekvens v. toppunkt	Ca. 2.5 sek.	Ca. 8 sek.	Ca. 10 sek.
Størrelse af hvirvler (U/W)	475m / 24m	500m / 40m	1100m / 37 m

Tabel 4.2 Data for de målinger der vist U og W spektre for i figur 4.8



Figur 4.9 U og W spektre normaliseret med middelvindhastigheden for målinger foretaget under vindretningerne 70, 95, 180, 190, 258 og 260 grader.

Det ses tydeligt at 70 og 95 grader vindretningen ikke resulterer i ensartet spektre, i modsætning til de to andre grupper, hvor spektrene ligger meget ens efter normaliseringen. Forskellen mellem 70 og 95 grader spektrene kan skyldes ventilationsskaktan i 90 grader retningen (se figur 3.3). Skakten vil give en øget turbulens, men afstanden til masten er kun 5.5m. Det er dermed ikke nødvendigvis en ruhedseffekt, men effekt af varm luft, der til tider sendes ud fra laboratorierne, der forstyrrer spektret.

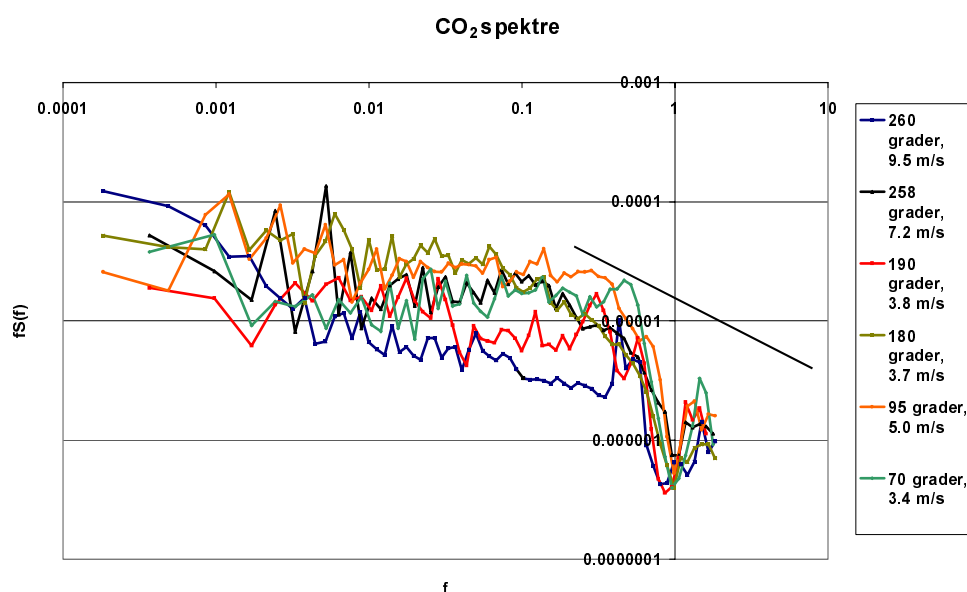
70 grader spektret minder meget om 180 og 190 grader spektrene, mens spektrene for 258-260 grader retningen har toppunkt ved højere frekvenser. Der ses altså en forskel i spektrene alt efter vindretning, og især 260 grader retningen, der er den retning med den længste afstand til tagets kant, skiller sig ud. Dette viser at turbulensen omkring masten, som forventet, er påvirket af forskellige faktorer alt efter retning og dermed inhomogen. Målingerne kan dermed ikke antages at være repræsentative for et større område af København, da de er påvirket af meget lokale forhold.

4.2.2 CO₂- og partikelspektre

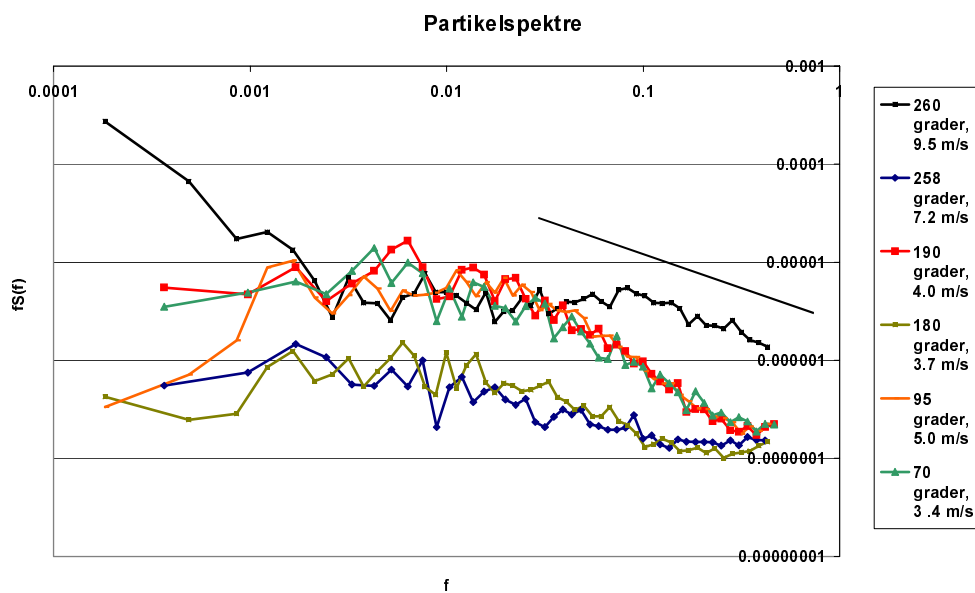
Figur 4.10 og 4.11 viser spektrene for CO₂ og partikelmålingerne for de tre vindretningsområder. Alle spektrene falder hurtigere end $-2/3$ hældningen i inertiområdet, hvilket viser at de højfrekvente bidrag ikke måles. Dette kan skyldes tab i systemet, og for partikelmålingerne også pga. reaktionstiden i CPC.

Der ses foldning i både CO₂ og partikelspektrene, dog tydeligere for CO₂ spektrene, hvilket kan skyldes, at der her afbildes data ved en højere frekvens end for partikelspektrene.

Den kraftige foldning i CO₂ spektret kan også være udtryk for pumpefrekvensen. Denne er ikke målt, og dermed er der heller ikke korrigeret for den.



Figur 4.10 Spektre for CO₂ for de tre vindretningsområder. $-2/3$ hældningen er indikeret ved den sorte linie.



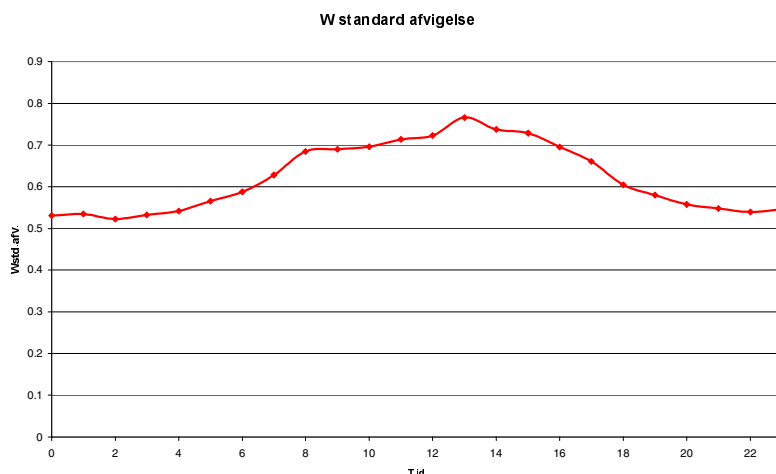
Figur 4.11 Spektre for partikelmålingerne for de tre vindretningsområder. $-2/3$ hældningen er indikeret ved den sorte linie.

Spektrene er forholdsvis flade og uden toppunkt, hvilket indikerer at den dominerende frekvens for maksimalt bidrag, ikke afsløres i denne analyse. De største variationer i både CO_2 og partikelkoncentrationer er med en langt lavere frekvens end der her afbildes, da de svinger med emissionerne, og dermed trafikken, døgnrytme. Det kan dermed forventes, at den største svingning vil have en frekvens på 24 timer. Både CO_2 og partikler transporteres dog af turbulensen, og mønsteret i spektret burde dermed også påvirkes af mønsteret for turbulens. Trods dette ses der ingen tydelig afhængighed af vindretning eller vindhastighed i spektrene, hvilket indikerer, at de primært vil afhænge af koncentrationsniveauet.

4.3 Stabilitetsforhold

I et uforstyrret flow vil den vertikale middelvind svinge omkring 0, og størrelsen af denne svingning vil afhænge af stabilitetsforholdene (Oke, 1987). Under ustabile forhold vil de opstigende hvirvler øge turbulensen i vertikal retning, og det må derfor forventes at standardafvigelsen på den vertikale vindkomponent dermed også øges.

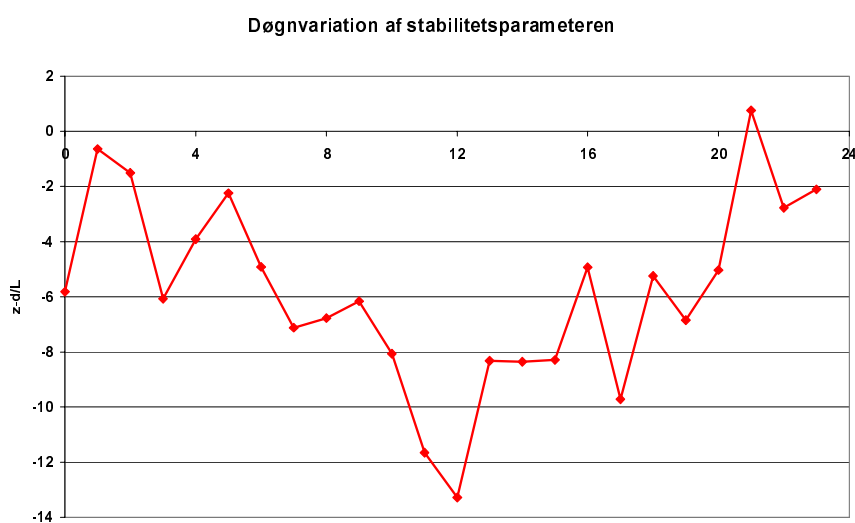
Det ses i figur 4.12 at standardafvigelsen på den vertikale vindkomponent følger det forventede mønster, og er større dagtimerne, hvor atmosfæren er mere ustabil, end i nattetimerne. Værdierne er ca. 20% højere i dagtimerne end i nattetimerne.



4.12 Standardafvigelse på den vertikale vindkomponent gennem døgnet. Gennemsnit af alle data.

En anden tilgang til bestemmelse af variationen i atmosfærens stabilitetsforhold er anvendelsen af Monin Obukhov similaritetsteori (MOS). Roth (2000) anvendte MOS over inhomogene overflader, trods teorien ikke kan forudsættes at være gældende her. Teorien kan heller ikke forudsættes at være gældende indenfor RSL, hvor det formodes, at målingerne fra indeværende forsøg er foretaget (se afsnit 2.3), men beregninger af stabilitetsparameteren ξ (formel 2.3) gav rimelige resultater.

Figur 4.13 viser døgnvariationen af ξ efter frasortering af outliers (1.5% af data, visuelt vurderet). ξ følger en forventet døgnvariation, med kraftigere instabilitet i dagtimerne end nattetimerne. ξ ligger under 0 gennem hele døgnet, bortset fra kl. 21. Dette indikerer at de gennemsnitlige stabilitetsforhold kan antages at være ustabile til nær neutrale gennem hele døgnet. Der er dog målinger der indikerer at atmosfæren til tider er stabil. Ca. 23% af målingerne resulterede i en stabilitetsparameter over 0.



Figur 4.13 Døgnvariation af stabilitetsparameteren, ξ ($z-d/L$, d er sat til $0.8 \cdot$ bygningshøjden). Negative værdier skyldes opad rettet varmeflux, og ustabile atmosfæriske forhold.

4.3.1 Varmeflux

Temperatursvingningerne gennem døgnet er sammenlignet med samtidige temperaturmålinger fra DMU, og det er konstateret at svingningerne er pålidelige. Beregninger af varmekraften, Q_h (formel 2.9) forudsættes derfor ligeledes at være korrekte. Enkeltstående voldsomme udsving i Q_h på over 600Wm^{-2} og under $(-100)\text{Wm}^{-2}$ (1.7% af data) er frasortet.

Data er inddelt i sommer (maj-september) og vinter (dec-feb). Der er ikke foretaget mange målinger i selve højsæsonen (pga. instrument nedbrud), og ”sommerperioden” er derfor forår og sensommer-efterår. Den ligger derfor lavere, end hvis det var data udelukkende for sommermånedene.

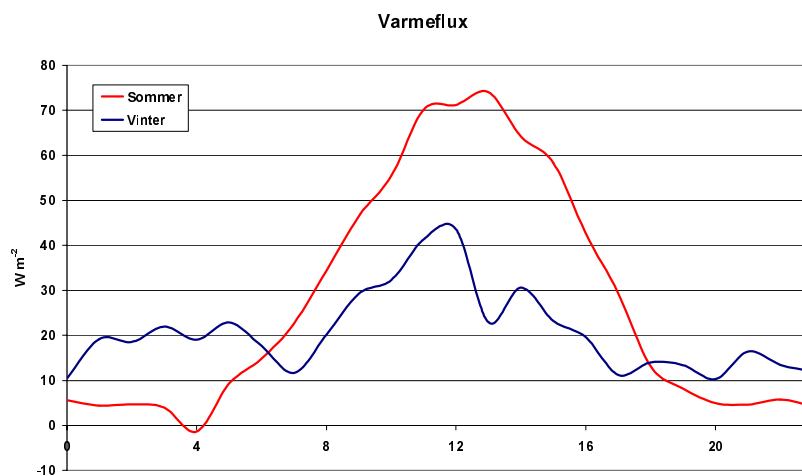
Døgnvariationen i den gennemsnitlige varmekraft for sommerperioden svinger mellem 1Wm^{-2} kl. 04 og 74Wm^{-2} kl.13. I vinterperioden svinger fluxen mellem 10Wm^{-2} kl. 24 og 44Wm^{-2} kl. 12. Se figur 4.14.

Varmekraften er højere for sommerperioden end vinterperioden i dagtimerne men lavere i nattetimerne. Dette kan skyldes den kraftige antropogene opvarmning af bygningsmassen i vinterperioden, der holder varmekraften oppe i nattetimerne.

Varmekraften er overvejende positiv gennem hele døgnet, hvilket igen indikerer at atmosfæren holdes ustabil, selv i nattetimerne. Dette må i sommerperioden antages at være pga. opmagasinering af varmen fra solindstrålingen i bygningsmassen gennem dagtimerne, og den efterfølgende frigivelse af energi i nattetimerne. I vinterperioden er det, som nævnt, antropogen opvarmning, der er årsag til den positive varmekraft.

Dette fænomen er også observeret i Basel, hvor målinger fra 1994-2002 under BUBBEL eksperimentet, afslørede opadrettede varmekraft i nattetimerne gennem hele året (Piringer et al., 2004)

Målinger af varmekraften i Edinburgh (Dorsey et al., 2002) viste, at den her kommer væsentligt under 0 i vinterperioden. Kun i sommerperioden opmagasineres varme nok til at opretholde en positiv varmekraft gennem hele døgnet. Varmekraften ligger her i intervallet -20 til 40Wm^{-2} i vinterperioden og -5 til 160Wm^{-2} i sommerperioden.



Figur 4.14 Varmefluxen for sommerperioden, maj-september og vinterperioden, december-januar.

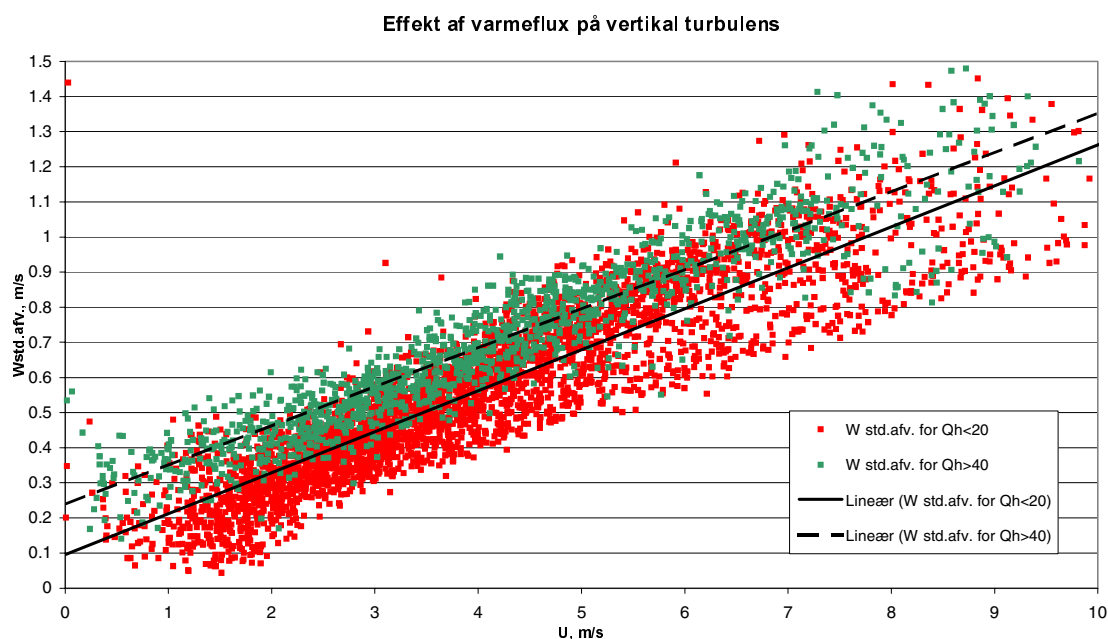
Den maksimale varmekraft i sommerperioden på 70 W m^{-2} fra dette forsøg er forholdsvis lavt. En undersøgelse af globalstrålingen i perioderne viste at sommerperioden havde maksimale værdier på 480 W m^{-2} i sommerperioden og 120 W m^{-2} i vinterperioden (vægtet gennemsnit ud fra antal GI målinger i de forskellige måneder. Se eventuelt appendiks 8 for globalstrålingen i måleperioden). Den sensible varmekraft burde ligge på ca. 30% af globalstrålingen, hvor de resterende 70% går til opmagasinering af varme i bygningsmassen, latent varmekraft og langbølget udstråling pga. den øgede overflade temperatur. Dette ville give en maksimal Q_h i sommerperioden på det dobbelte af den målte værdi.

En årsag til den forholdsvis lave varmekraft kan være at midlingsperioden på ½time er for kort for denne parameter, og at de lavfrekvete bidrag dermed ikke måles.

Den maksimale Q_h i vinterperioden ligger derimod på det forventede niveau.

Da der gennemsnitligt primært har været positiv varmekraft i måleperioden, og dermed ustabil atmosfære, vil dette også ses i den vertikale turbulens, da de termale hvirvler øges ved høje varmekraft.

Figur 4.15 relaterer standardafvigelsen på den vertikale vindkomponent til vindhastigheden, for målinger med høje Q_h , med målinger hvor Q_h var lav, eller negativ. Her ses den termiske turbulens, ved at en øget Q_h giver højere standardafvigelser på den vertikale vindkomponent. Det ses desuden, at jo højere vindhastigheden er, jo større er modstanden med underlaget og dermed den mekaniske turbulens.



Figur 4.15 Standard afvigelsen på den vertikale vindkomponent i forhold til middelvindhastigheden, relateret til henholdsvis høje og lave varmekraft.

4.4 Karakteristik af turbulensen

Med den forholdsvis lave målehøjde, måles der sandsynligvis indenfor RSL (se afsnit 2.3), hvilket betyder at turbulensen, ikke kan forventes at være horisontalt ensartet.

Hvis antagelsen omkring højden af RSL er 2-3 gange bygningshøjden benyttes (Roth 2000; Gryning og Bachvarova, 2005), vil det med en gennemsnitlig bygningshøjde på 14.2m i København og Frederiksberg kommuner (afsnit 3.1.1) give et RSL på ca. 30-40m. Med en målehøjde på 28m kan det dermed antages at der måles indenfor RSL, hvor turbulensen er meget inhomogen, og similaritets teorierne ikke er gældende.

Roth (2000) har ud fra analyser af turbulensdata over byområder fundet, at de bedste relationer mellem vindparametre og teori blev opnået ved $Z_S/Z_H > 2.5$. Målinger tættere på tagniveau resulterede oftest i støj. Dette understøtter ligeledes formodningen om, at turbulensmålingerne fra dette forsøg vil være påvirket af bygningsstrukturen.

4.4.1 Den vertikale vindkomponent

Ved placeringen af målestationen på taget af HCØ var det forventet, at turbulensen omkring masten ville være stærkt påvirket, af den turbulens der skabes omkring bygningen (afsnit 2.3.1).

Ved montering af er soniske anemometer i en mast vil selv masten påvirke strømmingen omkring instrumentet og dermed målingerne. Selv ved montering i toppen af en mast vil strømmingen været påvirket (Grelle, 1997).

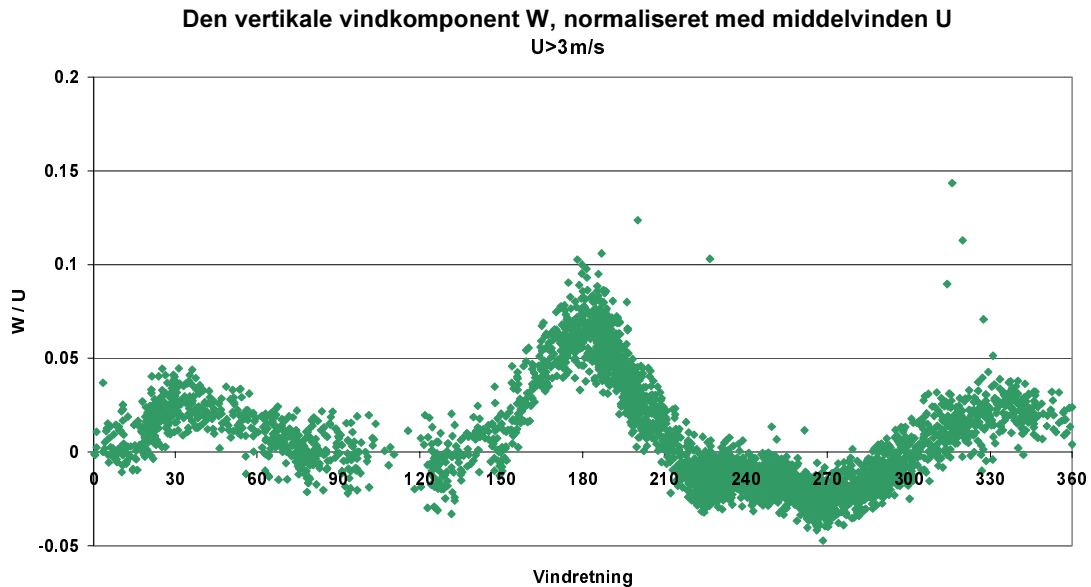
For at undersøge bygningens og mastens indflydelse på målingerne, ses der på middelværdierne af den vertikale vindkomponent w , før rotationen af koordinatsystemet. Denne vil i en uforstyrret horizontal strømning være 0. Selv ved en perfekt opsætning af det soniske anemometer, kan w dog afvige fra 0. Dette skyldes uundgåelige påvirkninger som konvektion eller skæv opsætning af instrumentet. Afvigelser i den vertikale middelvind på 0.05- 0.15 $m s^{-1}$ bør accepteres, da de vil opstå ved en hældning af anemometeret på kun 1-2° (Foken & Wichura, 1996).

Vinklen Beta, mellem den vertikale og den horisontale vind, giver ligeledes et indtryk af indflydelsen fra bygningen, men da denne er en beregnet vektor, vil den være påvirket af vindhastigheden, og give usikre beregninger ved lave vindhastigheder.

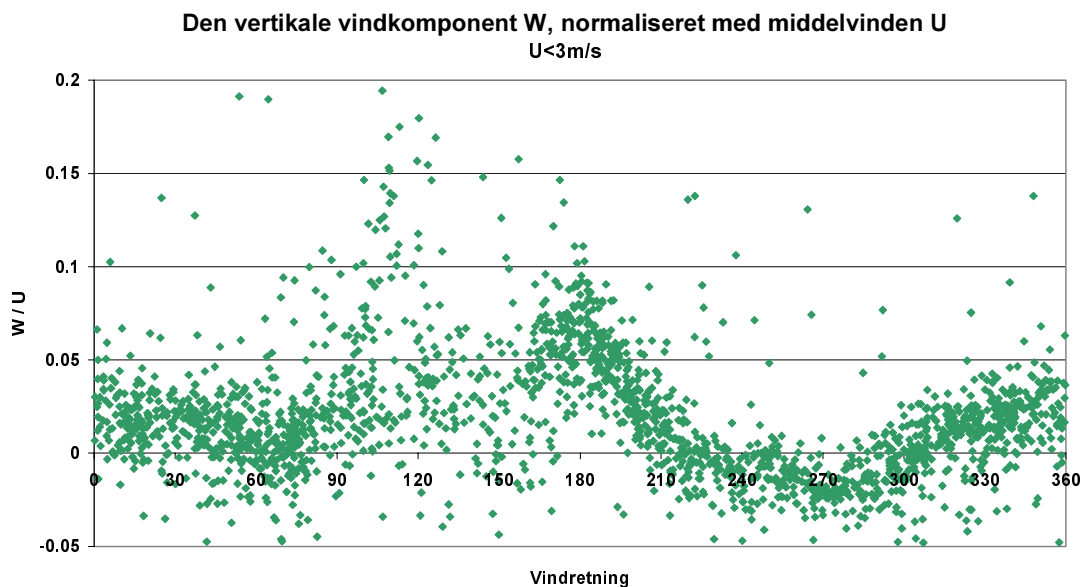
Figur 4.16 viser vindretningsafhængigheden af den vertikale vindkomponent normaliseret med middelvinden. Det ses, at der er et tydeligt mønster for i hvilke retninger, denne afviger fra den teoretiske værdi omkring 0.

Der er stort set ingen målinger med middelvindhastigheder over 3 $m s^{-1}$ fra 110° retningen, hvor masten er placeret. Målinger under 3 $m s^{-1}$ viste desuden megen støj i denne retning (figur 4.17). Dette kunne indikere at masten påvirker turbulensen, men målingerne fra DMU's kopanamometer i toppen af masten viser samme mønster. Det vides ikke hvorfor denne vindretning er så sjældent forekommende, eller hvorfor vindhastighederne i denne retning er meget lave.

Det kraftigste udsving i signalet opstår, når vinden kommer fra en vinkel af 180° . Her ses en tydelig opadrettet middelvind. Da denne ikke er spejlet i den modstående vinkel, kan det antages, at det ikke er en hældning i instrumentet, der er årsag til dette mønster.



Figur 4.16 W/U i forhold til vindretningen. Målinger med vindhastigheder over 3 m s^{-1} .

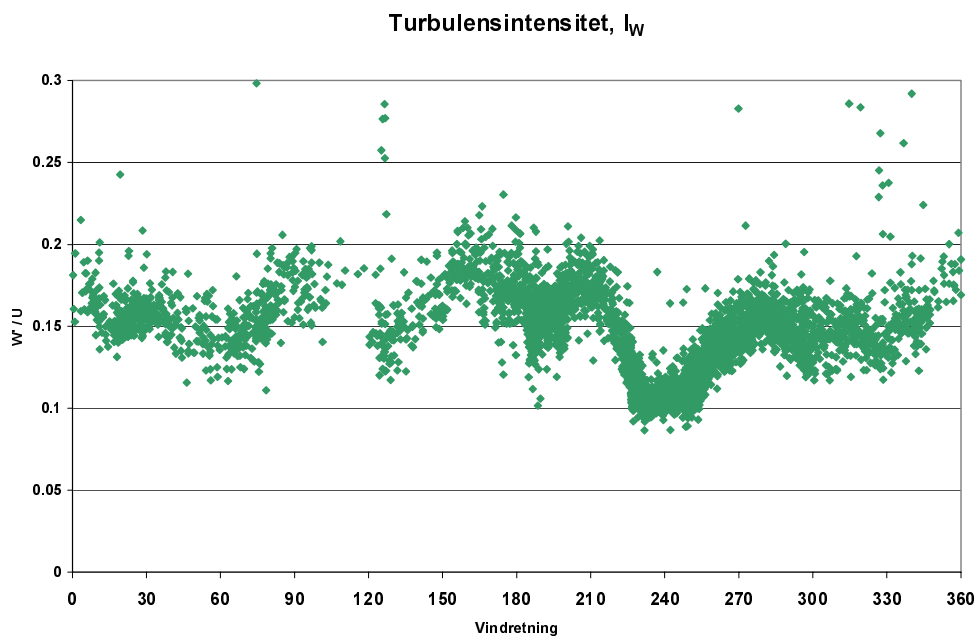


Figur 4.17 W/U i forhold til vindretningen. Målinger med vindhastigheder under 3 m s^{-1} .

Denne retning peger mod den korteste længdeakse af bygningen, vendende mod Idrætsinstituttets lave bebyggelse, tennisbaner og parkering (se fig. 3.3 og 3.4 for skitse af bygning og fotos). Her måles derfor en kraftig opadrettet hvirvel, når strømlinierne

bevæger sig fra det lavt bebyggede område og ind mod den høje HCØ bygning (se figur 2.7).

Det samme mønster ses ikke mod nord, hvor der ligeledes er kort afstand til tagets kant. Dette kan skyldes, at der i denne retning er endnu en af HCØ Instituttets bygninger, som er af samme højde, og at flow-feltet fra denne retning derfor er indstillet på bygningshøjden. I retningen ca. 240° til 280° ses en svagt nedadrettet vertikal middelvind. Udsvinget i W er kun 1% af U , hvilket kan være forårsaget af en skævhed i opsætningen på kun 0.6%, og kan derfor ikke antages at indikere noget om taget effekt på turbulensen. Retningen skiller sig til gengæld mærkbart ud ved analyse af turbulensintensiteten. Turbulensintensiteten (formel 2.1) for den vertikale middelvind (figur 4.18) er meget lav $240\text{-}280^\circ$ retningen. Dette er den vindretning, hvor der er den længste afstand til tagets kant. Det er desuden en af de vinkler, hvori der er placeret en støttebøjle på det soniske anemometer, som ifølge Grelle (1997) kan påvirke turbulensen. Dette skulle også give en øget turbulens i denne vinkel. Det er derfor ikke sandsynligt, at det er bøjlen på det soniske anemometer, der påvirker turbulensen. Den meget lave turbulens indikerer derimod at instrumentet i denne vinkel "ser" det flade tag.



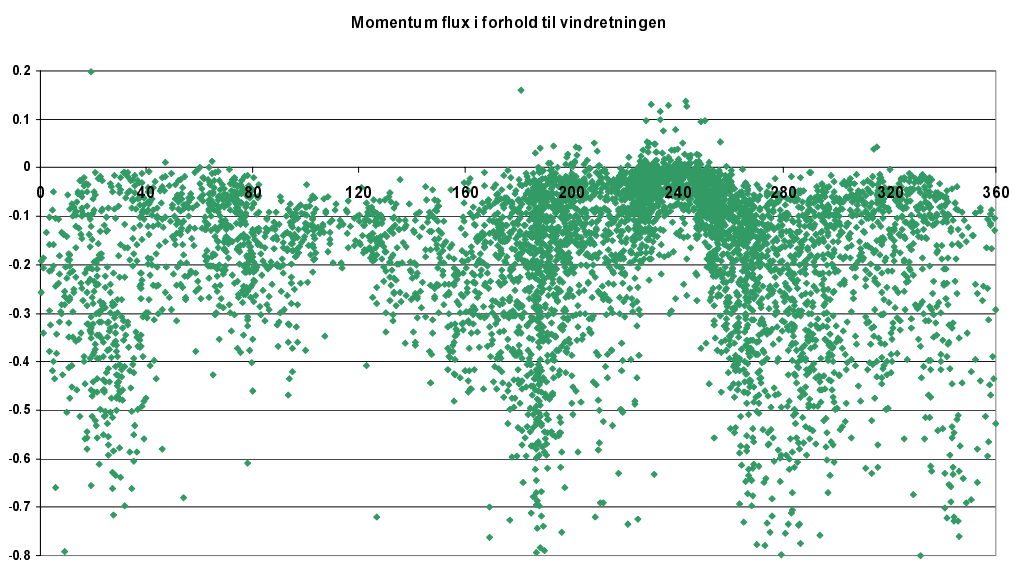
Figur 4.18 Turbulensintensiteten på W i forhold til vindretningen. Målinger med middelvindhastighed under 3 m/s er ikke afbildet, for at frasortere støj.

Slangen til CO_2 indtaget er monteret på bøjlen i 120° vinklen, og indsuget hertil kan forstyrre det soniske anemometer. Disse forstyrrelser vil være relativt mest dominerende ved lave vindhastigheder, og kan være medvirkende til, at der ses en del støj i denne vinkel ved middelvinde under 3 m s^{-1} (figur 4.17).

4.4.2 Momentumflux og friktionshastighed

Momentumfluxen vil være mere påvirket af effekten af bygningen end scalarfluxe, da den er påvirket af turbulensen i både horisontal og vertikal retning. Ligeledes er friktionshastigheden, der er kvadratet af momentumfluxen, meget følsom for ændringer i turbulensen, og disse to parametre anvendes derfor til videre undersøgelse af hvilke vindretninger, der vil resultere i fejlmålte partikel og CO₂ fluxe.

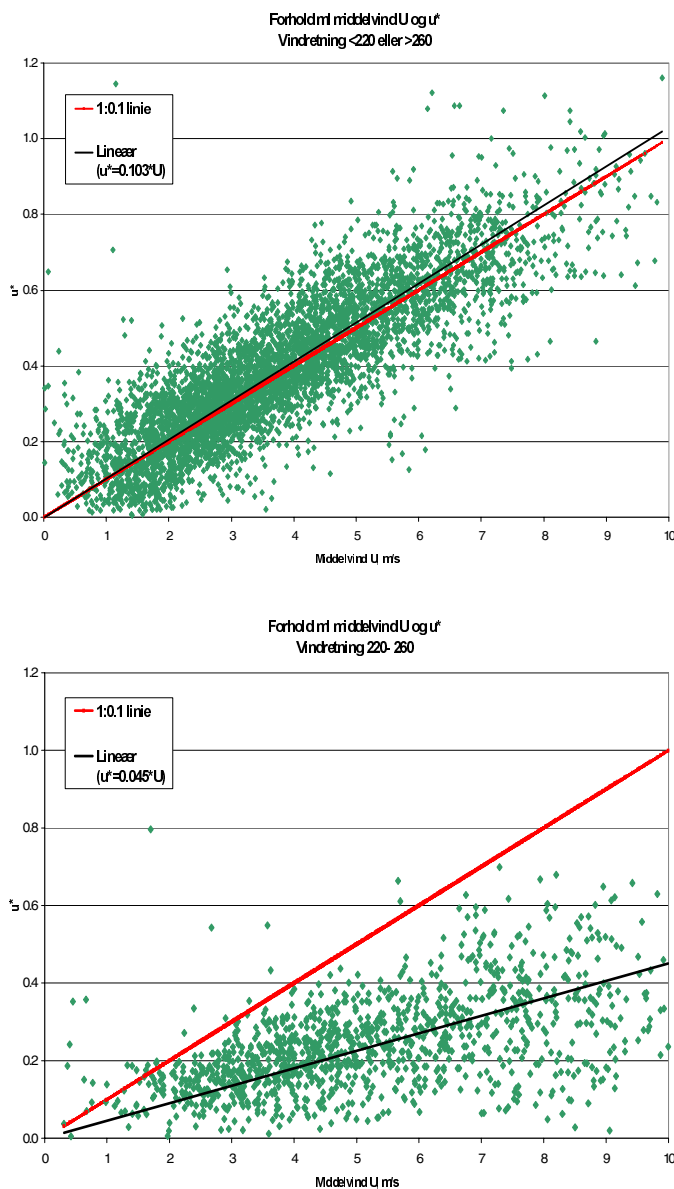
Momentumfluxen bør altid være negativ, da vindhastigheden stiger med højden, og momentum dermed transporteres nedad. Positive momentumfluxe vil derfor indikere, at målingerne kan være påvirket af fejl i opsætning eller turbulens fra bygningen. Figur 4.19 viser momentumfluxen i forhold til vindretningen, og det ses igen, at der er problemer med målinger omkring 240 grader retningen.



Figur 4.19 Momentumfluxen fordelt på vindretninger. Alle målinger.

Efter rotation af koordinatsystemet, således at den horisontale middelvind ligger i 0, kan u^* beregnes ud fra formel 2.5. En høj u^* indikerer en ru overflade, der skaber turbulens i både vertikal og horisontal retning.

Friktionshastigheden i forhold til middelvinden er typisk i størrelsesordenen 0.1. Figur 4.20 viser, at dette er tilfældet for målinger fra alle andre vindretninger end omkring 240 grader. Igen ses det at al turbulens forsvinder i denne retning, og at overfladen i denne vinkel ses som havende meget lav ruhed.



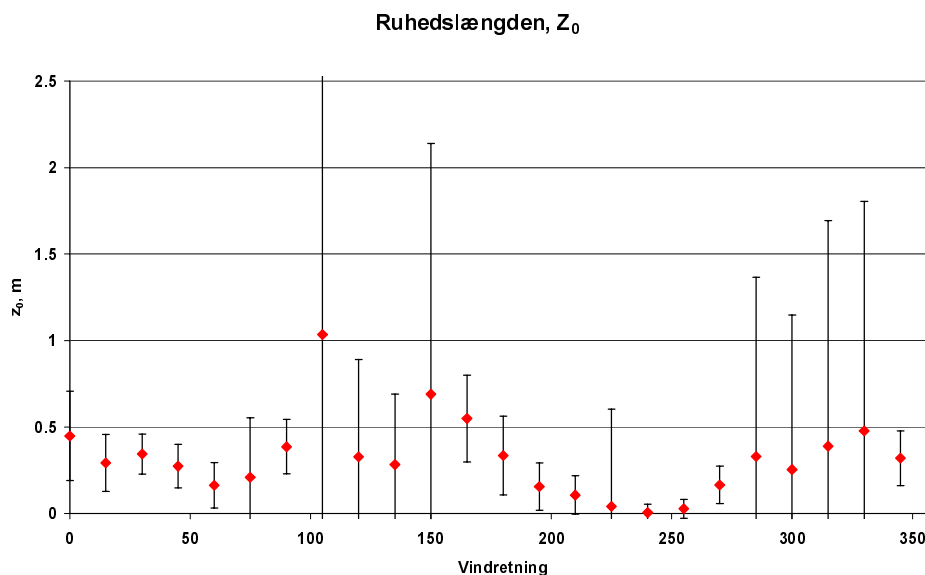
Figur 4.20 Forholdet mellem middelvinden U og friktionshastigheden u^* . Øverst: Målinger fra vindretninger mindre end 220 grader eller større end 260 . Nederst: Målinger fra 220 - 260 grader retningen. Den røde linie er $1:0.1$ forholdet mellem U og u^* , som kan forventes at gælde for målinger i en uforstyrret strømning.

4.4.3 Ruhedslængden, Z_0

Ruhedslængden, Z_0 , beregnes ud fra teorien om det logaritmiske vindprofil (formel 2.4), trods dette ikke kan forudsættes at være gældende indenfor RSL.

Z_0 værdierne er beregnet på målinger med vindhastigheder over 3 m s^{-1} for at fjerne støj (66% af målingerne). Ruhedslængderne udviser stor standardafvigelse på middelværdierne (figur 4.21), og variation med vindretningen. Igen har især 220 - 260 grader retningen meget lav ruhed. Den gennemsnitlige ruhedslængde for de accepterede vindretninger er 0.4 m med en standardafvigelse på 0.5 m .

Ruhedslængden på 0.4m er forholdsvis lav sammenlignet med værdierne for byområder opgivet af Panofsky og Dutton (1984) på 1-5m og Oke (1987, kap. 8) på 1-5m og 1.5-2.5 m for byer med under 5 etages bygninger. Det er dog ikke usandsynlig at den er korrekt, da området omkring HCØ er meget åbent med boldbaner og parker, der kan have påvirket målingen.



Figur 4.21 Z_0 i forhold til vindretningen. Standardafvigelsen er anført.

Ud fra ovenstående analyse ses det, at turbulensen er kraftigt påvirket af bygningen, og målinger foretaget under følgende vindretninger vil ikke være anvendelige til videre analyse:

- 90-120 grader: Pga. støj
- 160-200 grader: Pga. hvirvel op over bygning
- 220-260 grader: Pga. manglende turbulens- Måling "ser" taget

44% af målingerne er foretaget under disse vindretninger.

4.5 CO₂ og partikler

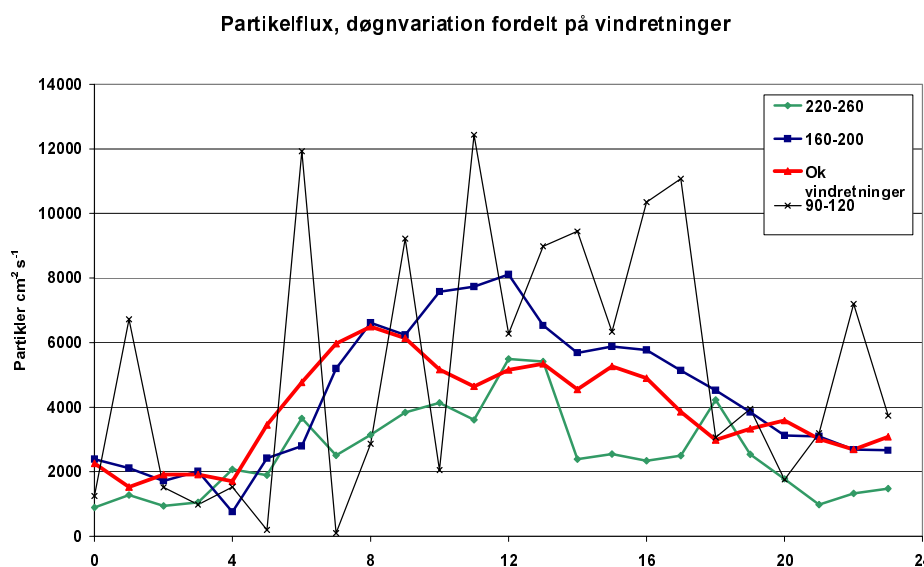
Den vigtigste opgave i dette projekt var, at konstatere om det var muligt at måle partikel og CO₂ fluxe fra den anvendte lokalitet og med den opstillede instrumentering.

Derfor er det vigtigt at vurdere selve metoden og primært analysere middelværdier og deres gennemsnitlige forløb, for at få et indblik i om målingerne er pålidelige.

Fokus er især lagt på partikelfluxene og korrektioner af disse, da dette ikke er prøvet før i et dansk byområde.

For at kunne konstatere om målingerne er anvendelige til fluxberegninger, analyseres døgnvariationen, da denne burde være relateret til trafikken. Fluxene kan dermed relateres til en kendt variation.

Figur 4.22 viser partikelfluxe beregnet ud fra de undersøgte vindretninger fra afsnit 4.4, og viser at fluxene er påvirket af vindretningen, formodentlig pga. problemerne med turbulensmålingerne. Det kan dog ikke udelukkes at forskelle i kildeområde, og datamængde også påvirker mønsteret i figur 4.22.



Figur 4.22 Partikelflux fordelt på vindretninger. Inddeling foretaget ud fra resultaterne af analysen af turbulensen på taget. 90-120 grader retningen er støj, 160-200 grader retningen er påvirket af en opadrettet hvirvel fra strømledningens møde med bygningen, der øger fluxen, og 220-260 grader retningen har meget lav turbulens.

4.5.1 Døgn- uge og årstidsvariationer

Ved analyser af døgnavariation er alle data fra sommerperioden vist i sommertid, og data fra vinterperioden i vintertid. Dette skyldes at døgnavariationen i både CO₂ og partikelflux, i høj grad er styret af antropogen aktivitet, som følger lokal tid.

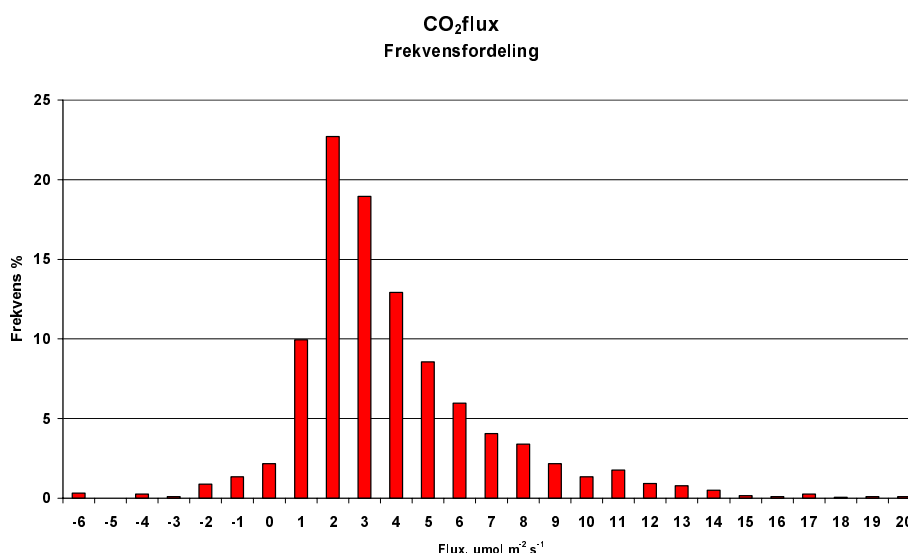
4.5.1.1 CO₂

Pga. de høje svingninger i CO₂ koncentrationen ses der ikke på gennemsnitsværdier for længere perioder. Gennemsnit kan dog beregnes for kortere perioder hvor niveauet lå stabilt.

Til analyser af døgn- uge og årstidsvariation er der valgt en sommer- og en vinterperiode, hvor CO₂ koncentrationen lå på stabile niveauer (se evt. appendiks 6 for graf over CO₂ koncentrationen gennem måleperioden). Perioden 18/5-4/6 2004 er valgt i sommerhalvåret og 7/1-31/1 i vinterhalvåret. Da de to perioder ikke ligger på samme niveau, kan kun forskelle i døgnavariationen sammenlignes, og dermed ikke den relative variation mellem de to perioder. CO₂ fluxene er dog ikke påvirket af koncentrationsniveauet, og data fra perioder hvor niveauet ligger stabilt kan derfor sammenlignes.

En frekvensfordeling af alle målinger viser, at 67% af målingerne resulterede i CO₂fluxe mellem 0 og 5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ (figur 4.23). Gennemsnitsfluxen er $3.3\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Depositionsfluxe udgør kun 4% af målingerne, og emissionerne er dermed dominerende, som forventet i et byområde.



Figur 4.23 Frekvensfordeling af CO₂flux målinger (1942 i alt). Fejlmålinger er frasorteret (afsnit 4.1.3)

På figur 4.24A ses døgnvariationen for CO₂ koncentrationen for sommer og vinter. Begge perioder udviser en døgnvariation med maksimale værdier i natte- og morgentimerne og mindre værdier i eftermiddagstimerne. Sommerperioden udviser maksimale koncentrationer kl. 03, og falder herefter mod minimum kl. 13, hvorefter kurven stiger igen. Vinterperioden udviser maksimale koncentrationer kl. 08 kort før solopgang. Herefter falder koncentrationerne indtil kl. 11, hvorefter de igen stiger mod et mindre maksimum i de sene eftermiddagstimer, for så at falde igen mod minimum kl. 22. Døgnvariationen i koncentrationsniveauet ligger på 13ppm i vinterperioden og 8ppm i sommerperioden. Denne døgnvariation er typisk (Nemitz et al., 2002; Idso et al., 2002), og skyldes udviklingen af blandingslaget efter solopgang, hvilket resulterer i en bedre opblanding af luftmasserne, og dermed lavere koncentration. Den øgede trafik i morgen- og eftermiddagstimerne (se figur 3.2 for døgnvariation i trafik) resulterer ikke i et højt koncentrationsniveau, pga. denne opblanding. Hen under aftenen vil blandingslaget blive lavere, og koncentrationerne vil dermed stige igen (Nemitz et al., 2002; Idso et al., 2002). Denne døgnvariation vil være mere udtalt i vinterperioden end sommerperioden, hvis der forekommer kraftigere og hyppigere temperatur inversioner i nattetimerne, hvilket der er større sandsynlighed for i vinterperioder end i sommerperioder. Inversionerne vil sænke blandingslagets højde væsentligt, og medføre ophobning af CO₂ koncentrationerne i nattetimerne og de tidlige morgentimer (Idso et al., 2002).

Uden temperaturinversioner vil det modsatte fænomen opstå, hvilket ser ud til at være tilfældet for indeværende forsøg. Både varmefluxe (figur 4.14) og vindhastigheder (figur

4.3) har større amplitude i døgnvariationen i sommerperioden, hvilket indikerer en større amplitude i højden af blandingslaget. Denne større døgnvariation i blandingslaget forårsager en større døgnvariation i koncentrationerne (Oke, 1987). Dette ses også i, at CO₂ koncentrationens døgnvariation groft set er spejlvendt af døgnvariationen i vindhastigheden og varmefluxen.

Vinterperiodens lavere CO₂ koncentrationer i nattetimerne end sommerperiodens kan derfor skyldes den høje antropogene varmeflux, der holder blandingslaget oppe i vinternattetimerne. I dagtimerne er blandingslaget højt i sommerperioden, så på trods af høje emissioner, stiger koncentrationerne ikke. I vinterperioden stiger blandingslaget ikke lige så meget i dagtimerne, som i sommerperioden, og koncentrationerne stiger derfor med emissionerne i morgenmyldretiden.

CO₂ fluxen (figur 4.24B) følger et andet mønster, med en døgnvariation meget lig trafikens. Dette er forventet, da trafikken er hovedkilden til CO₂ (51% i sommerperioden, Søgaard og Møller-Jensen, 2003), og fluxene hovedsagligt styres af emissionerne, og ikke af blandingslagets højde i samme grad som koncentrationerne. Beregningerne for vinterperioden er baseret på ca. 25% flere målinger end sommerperioden, og er derfor en mere jævn kurve, med 2 maksima der følger morgen- og eftermiddagsmyldretiden. Maksimale fluxe for begge perioder forekommer i dagtimerne og minimum fluxe i nattetimerne. Fluxene ligger højere i vinterperioden end i sommerperioden. Den maksimale flux på 6.3 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ for vinter og 4.5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ for sommer forekommer henholdsvis kl. 15 og 16, og den mindste flux på 2.0 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ for sommer og 1.5 $\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ for vinter forekommer i tidsrummet kl. 01-03.

Denne døgnvariation er ikke helt som forventet, da fluxene burde være højest med morgenmyldretiden, der er mere koncentreret end myldretiden i eftermiddagstimerne. Den forventede variation er bl.a. fundet af Søgaard et al. (2002) ud fra målinger i København. Udover den forventede døgnvariation, viste disse målinger 50% højere fluxe i vinterperioden end i sommerperioden, hvilket er lidt højere end de 30% forskel, som blev målt i indeværende forsøg. Den øgede flux i vinterperioden kan skyldes den øgede opvarmning, hvis langtransport bidrager til fluxen. Der er kun få boliger tilbage i København i dag med centralopvarmning og dermed afbrænding, så denne faktor bliver mindre og mindre vigtig for emissionerne. I 2005 var 95% af boligerne i København og Frederiksberg kommuner forsynet med fjernvarme mod kun 66% i 1995 (www.statistikbanken.dk/), og bidraget til CO₂ flux fra afbrænding er derfor primært udenfor byen.

Den lavere flux i sommerperioden kan skyldes CO₂ optag af vegetationen. På trods af forholdsvis sparsom vegetation i København, har Søgaard og Møller-Jensen (2003) målt et optag på 1 g carbon $\text{m}^{-2} \text{dag}^{-1}$ i juli måned. Dette skyldes til dels, at planternes CO₂ optag stiger i byområder pga. øgede temperaturer, fugtighed og CO₂ koncentrationer (Søgaard og Møller-Jensen, 2003; Idso et al., 2002).

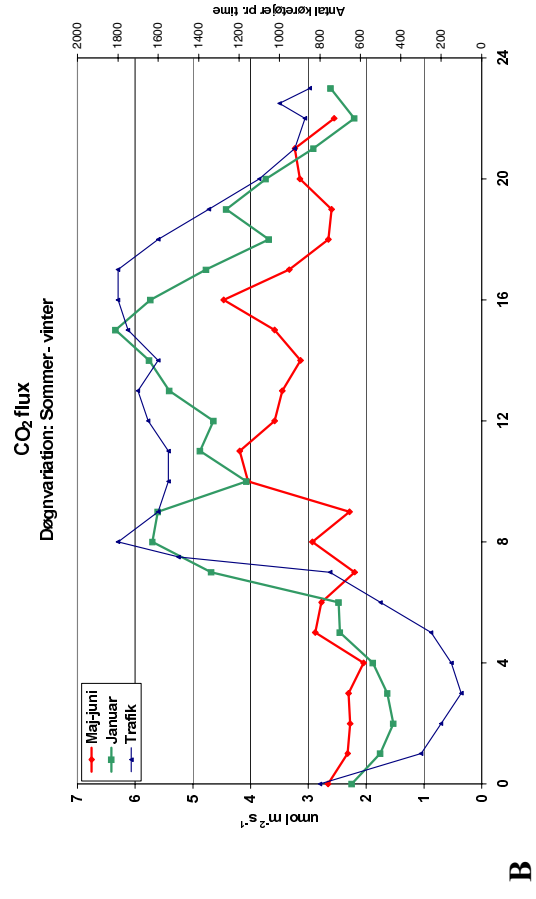
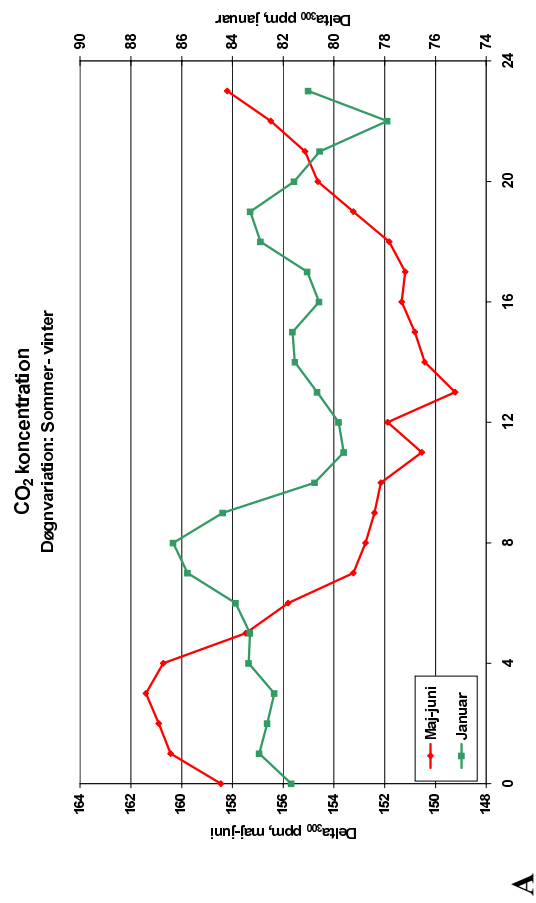
Da der er flere lørdag-søndags målinger i januar end i maj-juni, er vinterperioden valgt til at analysere hverdag-weekend variationen, for at få et større data-grundlag (en undersøgelse af målingerne fra sommerperioden viste samme tendens). Der er foretaget gennemsnit på 1-4 målinger pr. time i døgnet for søndage (gennemsnit 3.3), 2-8 målinger (gennemsnit 4) for lørdage og 15-21 (gennemsnit 17.5) målinger pr. time for hverdage. Koncentrationerne udviser ikke væsentlig forskel mellem hverdag, lørdage og søndage (se figur 4.24C), bortset fra højere niveauer lørdag nat ift. hverdage og søndage. Fluxene har derimod tydeligt forskellige døgnvariationer på hverdage og weekender (se figur 4.24D). Hverdags-døgnvariationen udviser maksimale fluxe i dagtimerne, kl. 06-18, og minimale i nattetimerne. Maks. værdien er på $73 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ kl. 8 og kl. 15, og minimum er på $0.8-1.5 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ i tidsrummet kl. 00-04. Hverdags-døgnvariationen følger dermed variationen i trafikintensiteten, og udviser den forventede stigning til maksimum med morgenmyldretiden.

På søndage ligger fluxen lavt hele døgnet, med en svag stigning i dagtimerne. Lørdags-døgnvariationen er meget ujævn. Der ses dog en tydelig forskel i nattetimerne mellem lørdage og det lave søndag-hverdag niveau. På lørdage ligger fluxen på $4.3-5.8 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ i tidsrummet kl.00-05, mens hverdage og søndage ligger på $0.8-2.0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ i samme tidsrum. Den øgede flux i nattetimerne på lørdage må anses at skyldes den øgede trafik af især taxaer pga. byens natteliv. Resultaterne fra weekend-hverdags variationen skal dog holdes op mod, at de er baseret på et lille datagrundlag.

Døgnvariationen i CO_2 koncentrationen i vinterperioden er sammenlignelig med målinger foretaget af Nemitz et al. (2002) over Edinburgh bykerne i oktober-november 2000.

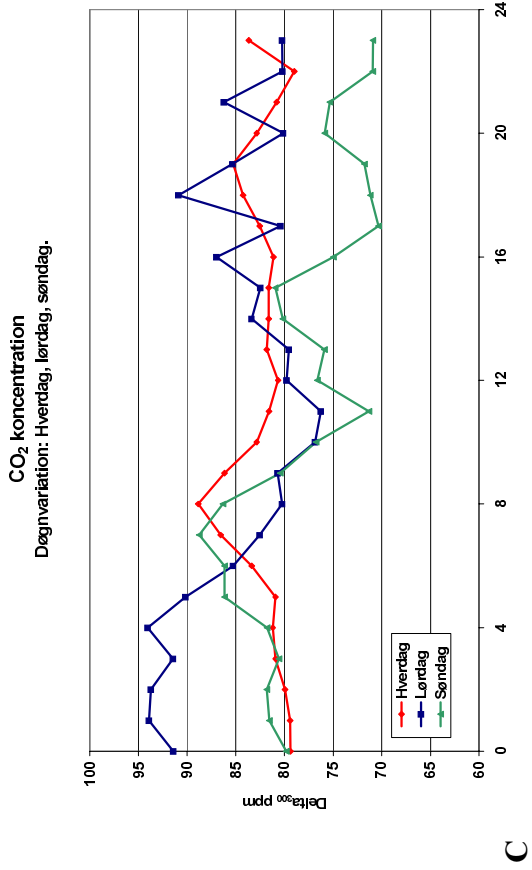
Døgnvariationen i partikelkoncentrationen over byen måltes her til ca. 7ppm med maksimale værdier kl. 07 og minimum om eftermiddagen. Fluxene fra byens centrum var mellem $50-75 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ i dagtimerne og $10 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ i nattetimerne, hvilket er væsentligt højere end fluxene fra dette forsøg. Dette kan skyldes, at en stor del af boligerne i Edinburgh har gasovne til opvarming. Ifølge Nemitz et al. (2002) bidrager gasovnene med $10-15 \mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ over bykernen, med maksimale værdier i morgen og aftentimerne hvor folk er i deres hjem.

Målingerne fra dette forsøg er desuden sammenlignelige med resultaterne fra Soegaard og Møller-Jensen (2003), der målte fluxe på $11 \text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ for maj-juni over København. Fluxene fra dette forsøg i maj-juni ligger på gennemsnitligt $11.3 \text{g CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, og anses derfor for værende pålidelige trods mindre afvigelser fra den forventede døgnvariation.

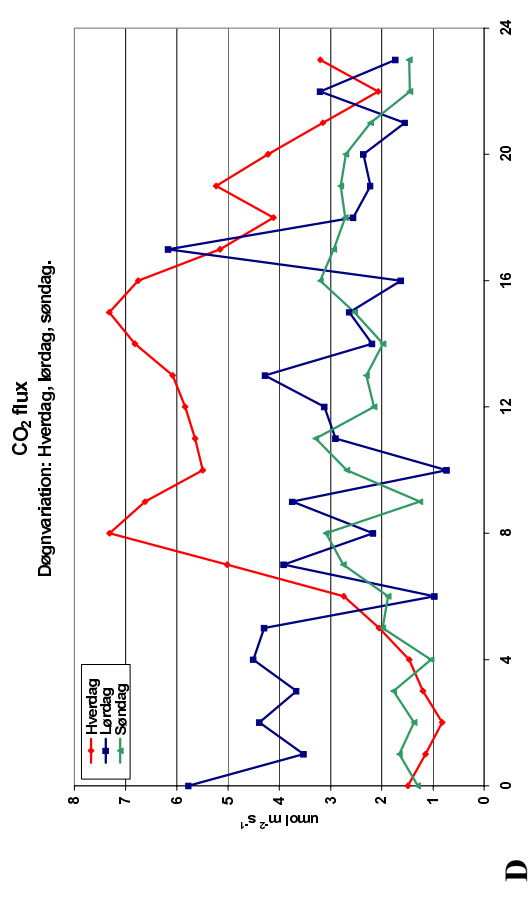


A

B



C



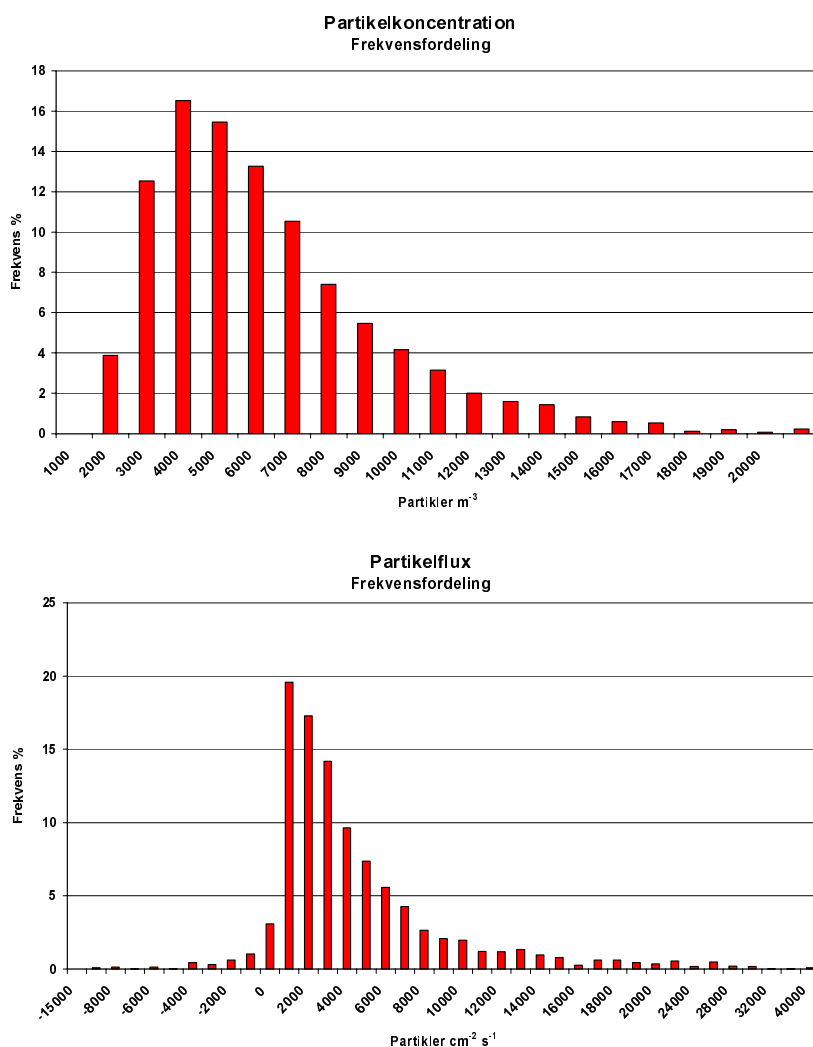
D

Figur 4.24 Døgnvariation for CO₂koncentration og flux. Analyseret for sommer-vinter variation (A og B) og hverdag-weekend variation (C og D).

4.5.1.2 Partikler

Frekvensfordelingen af alle partikelkoncentrations- og fluxmålingerne viste at 55% af koncentrationsmålingerne ligger mellem 2000 og 6000 partikler cm^{-3} . Middelværdien for partikelkoncentrationerne er 4850 partikler cm^{-3} .

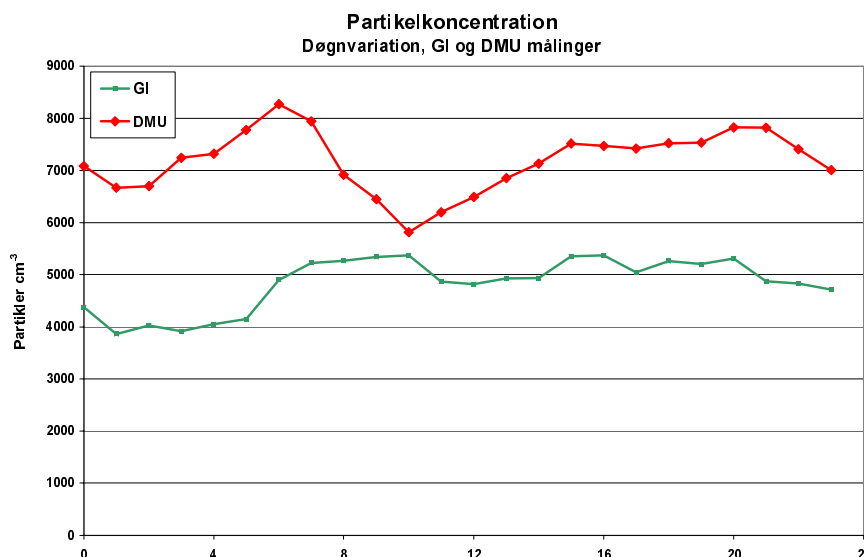
50% af fluxmålingerne ligger mellem 0 og 3000 partikler $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$, og middelværdien for alle fluxe er 3900 partikler $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$. Kun i 6% af målingerne forekommer deposition, og området omkring HCØ er dermed primært en kilde til partikler.



Figur 4.25 Frekvensfordeling af partikelkoncentrations (2633 målinger)- og fluxmålinger (2299 målinger). Målinger fra turbulens-forstyrrede vindretninger er frasorteret.

Den gennemsnitlige døgnvariation for partikelkoncentrationerne ligger mellem minimumværdien på 3860 partikler cm^{-3} kl. 01 og to maksima på 5350 partikler cm^{-3} kl. 07-10 og kl. 15-16 for GI målingerne (se figur 4.26). DMU målingerne ligger gennemsnitligt ca. 2000 partikler cm^{-3} over GI. Forskellen mellem denne variation, og variationen på 7% baseret på alle samtidige målinger, kan skyldes at gennemsnittene for

DMU er beregnet på al data fra perioden, og fra GI målingerne kun på de accepterede vindretninger. Data er derfor ikke er for identiske perioder. Dette kan indikere, at selvom DMU målingerne i gennemsnit kun ligger 7% over GI for alle samtidige målinger (figur 4.5), kan GI målingerne muligvis være sat ud, på tidspunkter hvor der har været høje koncentrationer, og dermed resultere i lavere døgn gennemsnit.



Figur 4.26 Døgnvariationen i partikelkoncentrationer for DMU målingerne og GI målingerne.

På figur 4.27A ses døgnvariationen i partikelkoncentrationerne i sommer (maj-september: 1613 målinger) og vinterperioden (januar: 619 målinger). Sommerperioden udviser meget lille døgnvariation med minimum koncentrationer kl. 01-03 på 4500 partikler cm^{-3} , og maksima i dagtimerne kl. 15 på 6100 partikler cm^{-3} . Denne manglende døgnvariation findes også i data fra DMU målingerne, og er derfor ikke en fejl i målingerne. Da CO_2 koncentrationerne udviste en forventet døgnrytme i sommerperioden, kan det ikke konkluderes, at det er et klimatologisk fænomen, der er årsag til dette. Partikel og CO_2 koncentrationerne burde reagere ens. Det kan dog ikke udelukkes, at det er en uheldig kombination af målingerne, der resulterer i et misvisende gennemsnit, og at kortvarige vejr-fænomener kan have spillet ind, da gennemsnit af CO_2 og partikelmålingerne ikke er foretaget på fuldstændigt ens perioder.

Vinterperioden udviser større døgnvariation end sommerperioden. Her ses en tydelig stigning i koncentrationen samtidigt med morgen myldretiden, mens blandingslaget stadig er lavt. De laveste koncentrationer på 3500 partikler cm^{-3} forekommer kl. 04, og de højeste koncentrationer på 7000 partikler cm^{-3} kl. 07-08

Den største forskel mellem vinter- og sommerkoncentrationerne forekommer i nattetimerne, hvor målingerne fra vinterperioden ligger væsentligt lavere end målingerne fra sommerperioden.

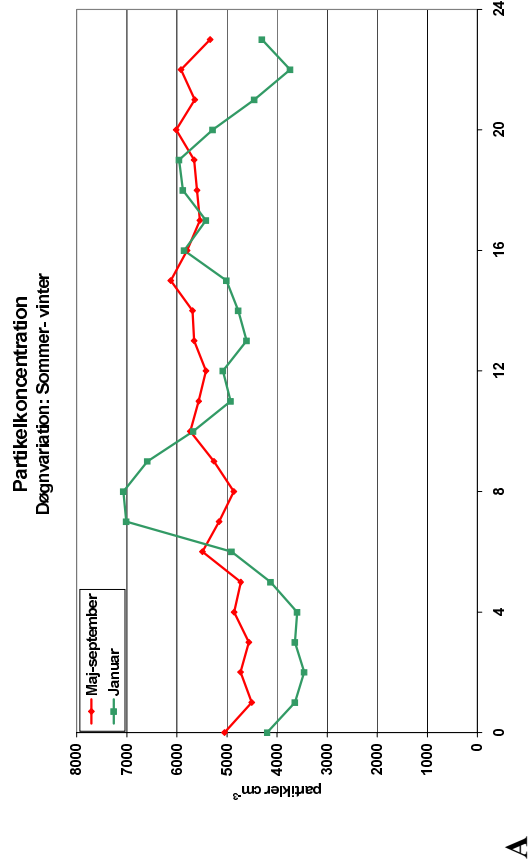
Dette kan skyldes samspillet mellem variationen i blandingslagets højde og emissionerne, som beskrevet ved sommer/vinter døgnvariationen i CO₂ koncentrationer (se afsnit 4.5.1.1).

Døgnvariationen for partikelfluxer udviser et ensartet mønster for sommer- og vinterperioden (figur 4.27B) med maksimale værdier i dagtimerne og minimumværdier i nattetimerne. Som forventet følger fluxene variationen i emissionerne og dermed døgnvariationen i trafikken (Shi et al., 2001; Dosey et al., 2002). Både sommer og vinterfluxene udviser et dyk kl. 11, svarende til den lavere trafikmængde på dette tidspunkt. Fluxene i vinterperioden er lavest kl. 03 på 1200 partikler cm⁻² s⁻¹, og højest kl. 08 på 8100 partikler cm⁻² s⁻¹. I sommerperioden forekommer minimumværdien på 1600 partikler cm⁻² s⁻¹ kl. 01, og maksimumværdier kl. 07-09 på 6000-6300 partikler cm⁻² s⁻¹, samt et mindre maksimum kl. 15 på 5700 partikler cm⁻² s⁻¹. De højere partikelfluxer i vinterperioden kan, som CO₂ fluxene skyldes langtransport. Trafikintensiteten i København skulle være ensartet igennem året, bortset fra et fald i juli pga. industri-ferien, så uden direkte trafiktællinger for perioden, kan den øgede flux ikke tilskrives trafikken (se afsnit 4.5.2 for yderligere undersøgelse af trafik-flux relationen).

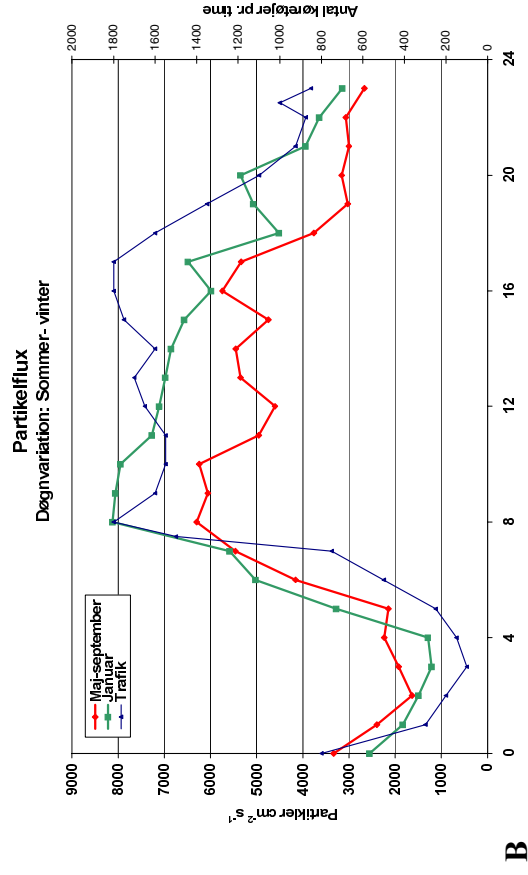
Ugevariationen for partikelkoncentrationer (figur 4.27C) viser størst forskel mellem weekend og hverdage i nattetimerne, hvor hverdags-målingerne ligger lavere end lørdags-søndags målingerne. Koncentrationerne på lørdage ligger forholdsvist stabilt på omkring 5000 partikler cm⁻³ i tidsrummet kl. 03-14, hvorefter de stiger til maksimum værdien på 6700 partikler cm⁻³ kl. 15. Dette svarer til det tidsrum hvor butikkerne lukker (kl. 13-15), og der kan derfor forventes øget trafik. Et nyt maksimum opstår kl. 22 på 6500 partikler m⁻³, og koncentrations niveauet holdes højt et stykke ind i søndag nat. Dette stemmer overens med mønsteret observeret i CO₂ fluxer, og kan dermed ligeledes relateres til den øgede mængde taxaer natten mellem lørdag og søndag. Koncentrationen tidlig søndag morgen er også højere end resten af dagen. De fleste taxaer er dieslbiler, og udstødningsskævet herfra er derfor mere partikelholdigt end fra benzinbilerne, der dominerer trafikken i dagtimerne.

Partikelfluxene (figur 4.27D) udviser stor variation mellem hverdag og weekend i dagtimerne, hvor hverdags-fluxen følger trafikken døgnvariation. Maksimum værdier på 6500-7000 partikler cm⁻² s⁻¹ måles samtidigt med morgenmyldretiden kl. 07-09, hvorefter kurven dykker kl. 11 med trafikken, og ligger derefter på ca. 6500 partikler cm⁻² s⁻¹ resten af eftermiddagen. Minimum fluxer på 1800-2000 partikler cm⁻² s⁻¹ måles i nattetimerne kl. 00-04.

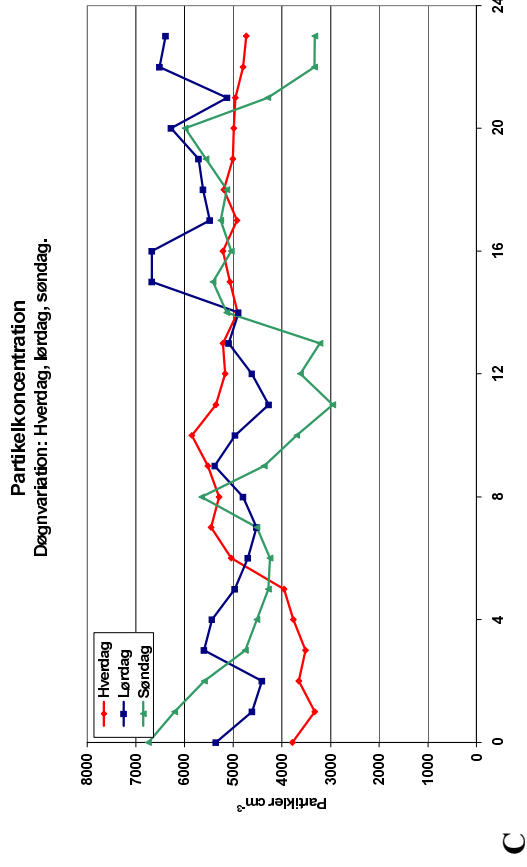
Weekendfluxene stiger ikke til samme høje niveau i dagtimerne som i hverdage, da trafikken, og dermed emissionerne, ikke stiger. Der observeres igen en stigning lørdag nat svarende til den øgede mængde taxaer på dette tidspunkt i gaderummet, som allerede diskuteres.



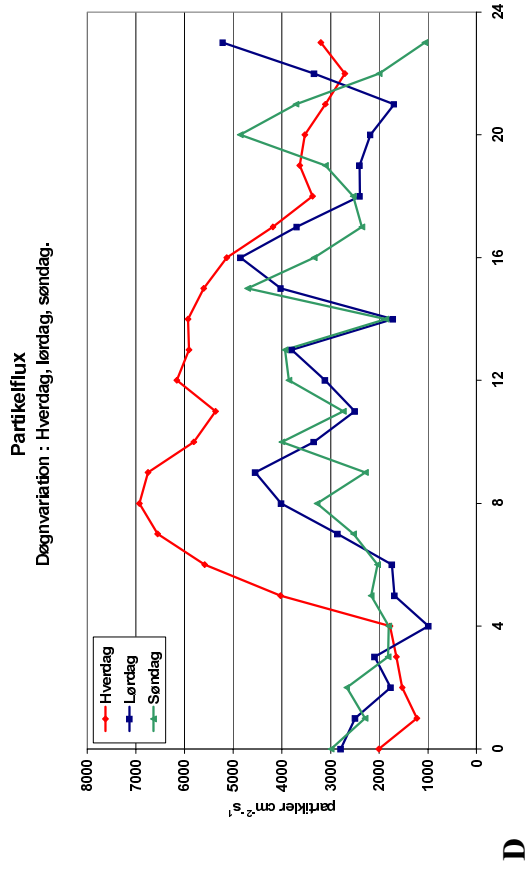
A



B



C



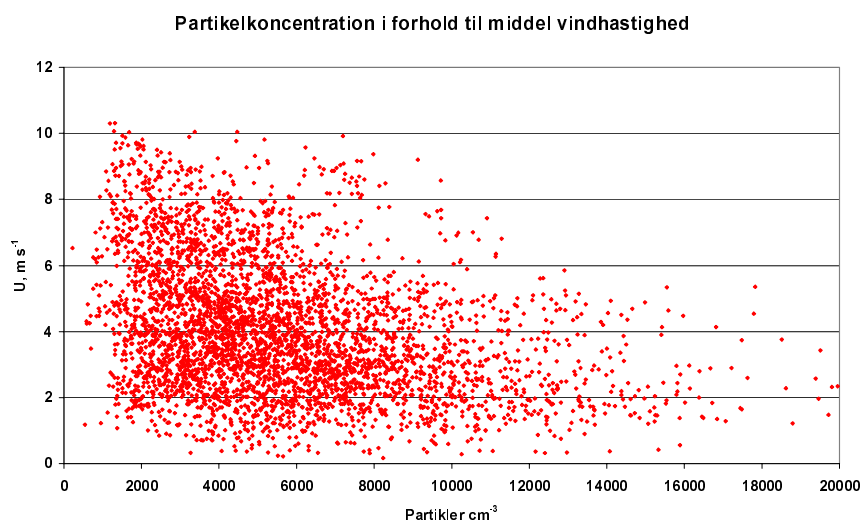
D

Figur 4.27 Døgnvariation for partikelkoncentration og flux. Analyseret for sommer-vinter variation (A og B) og hverdag-weekend variation (C og D).

Dorsey et al. (2002) målte gennemsnits døgnvariation af partikelkoncentrationer over Edinburgh på $3000\text{-}20.000\text{ cm}^{-3}$ ($11\text{nm}\text{-}3\mu\text{m}$, z_m : 67m), med minimum kl. 04 og maksimum kl. 10 og kl. 16-18. Partikelkoncentrationerne over Edinburgh er dermed væsentligt højere, og udviser en større døgnvariation end koncentrationerne over København. Dette kan skyldes lavere emissioner i København pga. en større andel biler med katalysator, Edinburghs større andel af centralopvarmede boliger, eller muligvis Københavns gunstige vejrforhold (se afsnit 1.1).

Også partikelfluxene over Edinburgh er højere end målingerne fra indeværende forsøg. Minimum på $9.000\text{ partikler cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ målt i tidsrummet kl. 02-06, og maksimum på $90.000\text{ partikler cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$ blev målt kl. 12 og kl. 16 med et svagt fald kl. 14 (Dorsey et al., 2002). Disse resultater ligger tæt op af resultater fra Stockholm af Mårtensson et al. (2003), der målte maksimale fluxe over byen i morgenmyldretiden på $10.000\text{-}100.000\text{ partikler cm}^{-2}\text{ s}^{-1}$.

Sokhi et al. (2001) har analyseret en række forureningsepisoder i Europæiske byer, og fandt at vindhastigheden og tilstedeværelsen af inversioner, var de dominerende faktorer for høje partikelkoncentrationer (PM_{10}). Især London og Helsinki viste sig at have lave vindhastigheder, med henholdsvis 25% og 45% $< 2\text{ m s}^{-1}$. Til sammenligning var kun 14% af vindmålingerne mindre end 2 m s^{-1} under dette forsøg. Dette understøtter resultaterne med forholdsvis lave koncentrationer i København pga. gunstige vejrforhold. Figur 4.28 viser partikelkoncentrationerne i forhold til vindhastigheden, og det ses, at der er en faldende tendens, hvilket som nævnt hænger sammen med variationen i den øgede opblanding.



Figur 4.28 Partikelkoncentration i forhold til middelvindhastigheden. Fejlmålinger frasorteret, heriblandt målinger under orkanen.

Ruuskanen et al. (2001) har målt partikelkoncentrationer i 3 Europæiske byer, Alkmaar i Holland, Erfurt i Tyskland og Helsinki i Finland. Døgngennemsnit af koncentrationerne lå på 20.300-25.800 partikler cm^{-3} , altså alle væsentligt højere end København. Helsinki havde de laveste værdier af de tre byer, trods de meget lave vindhastigheder målt af Sokhi et al. (2001).

De væsentligt lavere fluxe fra dette forsøg, sammenlignet med andre, kan dermed skyldes dels de lavere koncentrationer og dermed emissioner, og dels det store tab der kan forventes med det anvendte system. Størrelsen af flux-tabet vil blive diskuteret i afsnit 4.6.

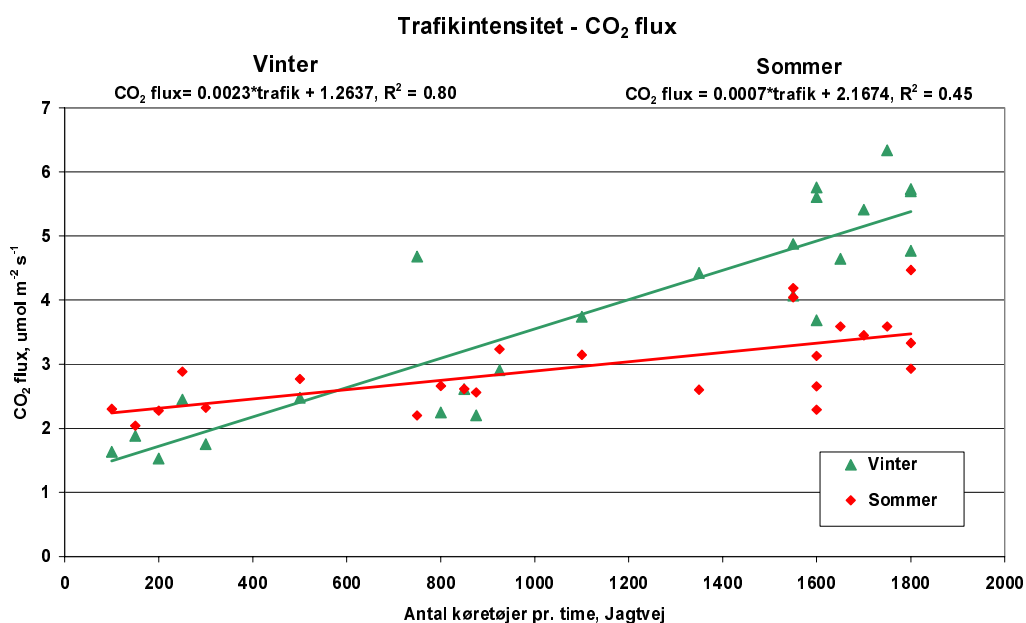
Graf over alle partikelfluxmålinger er vist i appendiks 9.

4.5.2 CO₂ og partikelflux i forhold til trafikvariation

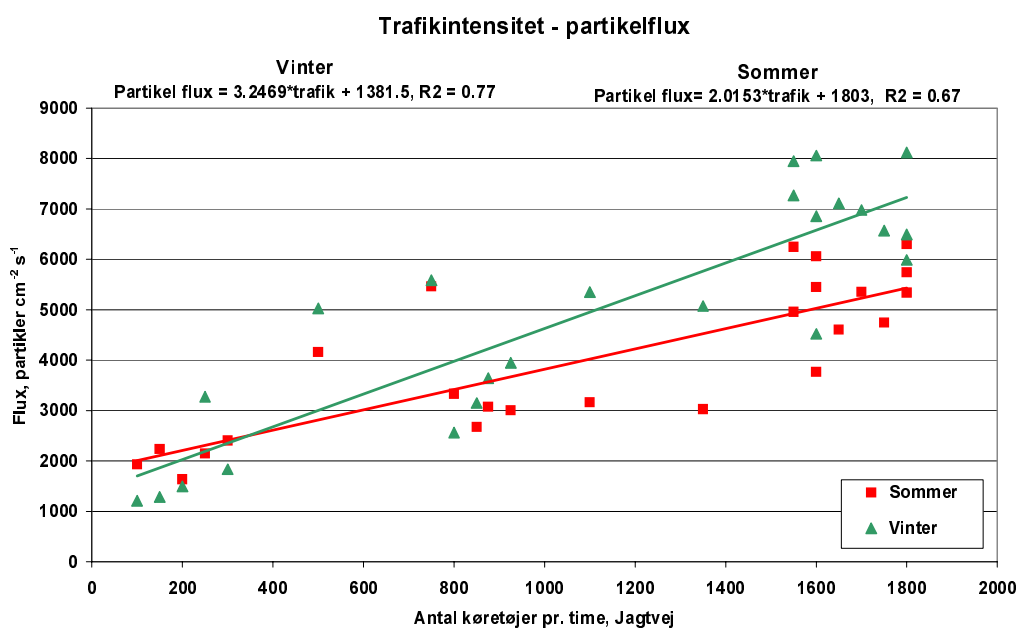
CO₂ og partikelfluxen er i høj grad styret af trafikvariationen, da denne som nævnt er hovedkilde til emissionerne. Figur 4.29 og 4.30 viser fluxene i forhold til trafikintensiteten, og det ses at for både CO₂- og partikelfluxen, er korrelationen med trafikintensiteten større i vinter end i sommer perioden. For CO₂ fluxen kan 80% af variationen beskrives ud fra denne ene parameter i vinterperioden, mod 45 % i sommerperioden. For partikelfluxen kan 77% af variationen i fluxen i vinterperioden, og 67% i sommerperioden, beskrives ud fra trafikintensiteten.

Kurverne for sommer og vinter burde have samme hældning, da trafikintensiteten ikke ændres med sæsonen. Der burde desuden ses større spredning i data ved de lave trafikintensiteter. Her vil andre parametre der påvirker fluxene relativt betyde mere end ved de høje trafikintensiteter.

Forskellen mellem sommer og vinter blev også observeret i fig. 4.24B og 4.27B, hvor døgnavariationen i fluxene i sommerperioderne ikke fulgte variationen i trafikken i samme grad som fluxen i vinterperioden.



Figur 4.29 Forholdet mellem CO₂ flux og trafikintensitet for sommer (18/5-4/6) og vinter (7/1-31/1).



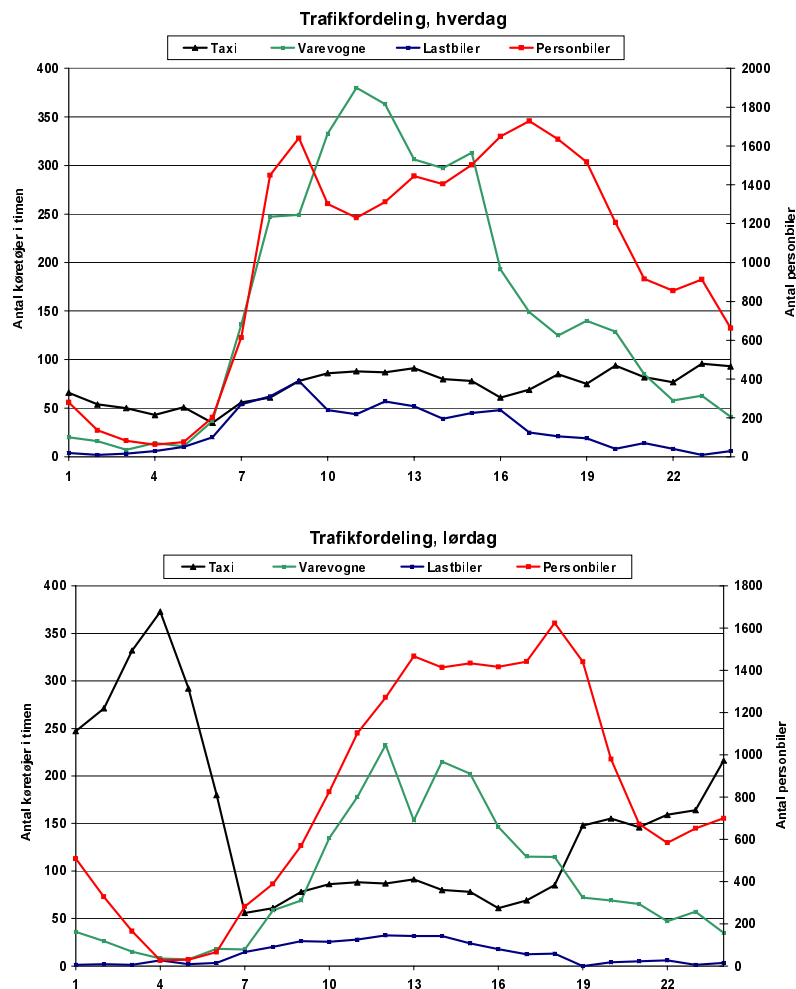
Figur 4.30 Forholdet mellem partikelflux og trafikintensitet for sommer (6/5 -24/9) og vinter (9/1-12/2).

Dette kan som nævnt ikke umiddelbart tilskrives en ændret trafikintensitet, og forklaringen må derfor være, at andre forhold som f.eks. CO₂ optag af vegetation, afbrænding fra industri, flere køretøjer med koldstart i vinterperioden, eller meteorologiske forhold påvirker fluxene. Et højere blandingslag i sommerperioden kan tænkes at give bedre opblanding og dermed lavere fluxe. Hvis fremtidige forsøg skal kunne lede til at fluxene skal kunne modelleres, er det derfor nødvendigt at undersøge disse forhold nærmere.

Soegaard og Møller-Jensen (2003) fandt også et lineært forhold mellem CO₂ fluxe og trafikintensitet i København, med korrelationer på 53% i vinterperioden og 86% i sommerperioden.

Trafikken er her beskrevet som antal køretøjer i timen, og forklaringsgraden ville være højere, hvis trafikken blev beskrevet ud fra en vægtning af køretøjer. Personbilerne udgør 75% af det totale antal køretøjer (data fra OSPM model, DMU), hvor de sidste 25% er lastbiler, varevogne, taxier og busser, der alle har udstødningsgas med en gennemsnitlig højere partikelemission end personbilerne.

Figur 4.31 viser fordelingen af køretøjer på Jagtvej (data fra OSPM model af Ruwim Berkowicz, DMU) på hverdage og lørdage. På hverdage er antallet af varevogne og lastbiler højest i morgen- og formiddagstimerne, mens eftermiddags-maksimum kun ses for personbilerne. Dette kan være med til at forklare hvorfor partikelfluxene falder tidligere på eftermiddagen end trafikkurven (figur 4.27B).

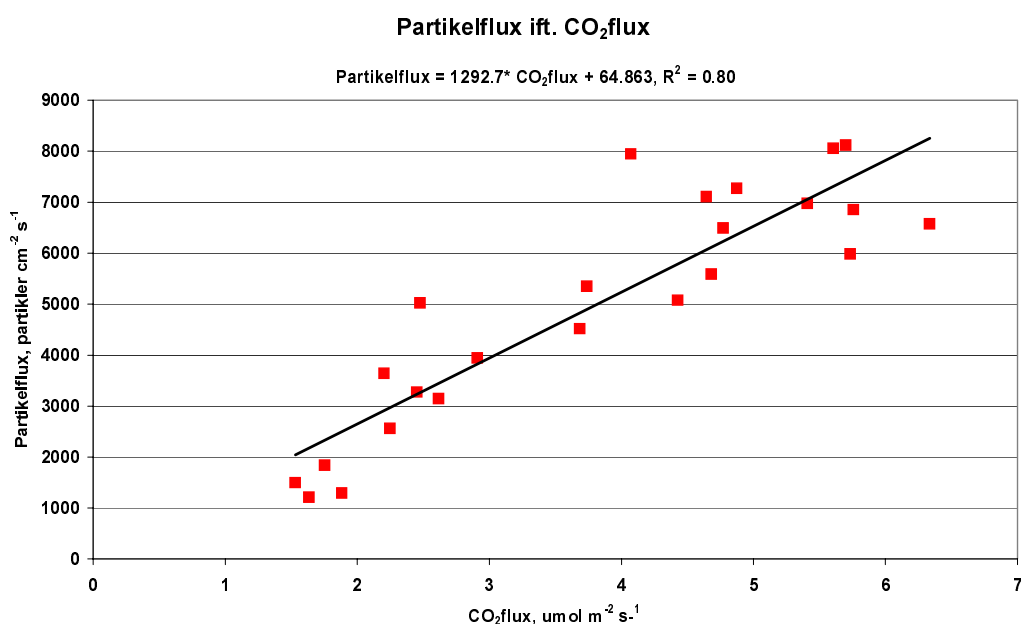


Figur 4.31 Trafikfordelingen gennem døgnet på Jagtvej på hverdage (øverst) og lørdage (nederst). Venstre y-akse angiver antal køretøjer i timen for taxi, varevogne, lastbiler og højre y-akse for personbiler.

Det store antal taxaer lørdag nat, som tidligere er omtalt, ses også tydeligt i figur 4.31.

Ud fra ovenstående figurer kan det dermed konstateres at fluxene bedst beskrives ud fra trafikken i vinterperioden, og det er derfor undersøgt, hvor korreleret fluxene af de to parametre er i denne periode. Figur 4.32 viser at forholdet mellem partikelflux og CO₂flux for januar måned er stort set linært med en høj korrelation på 0.8.

Sommerperioden viste meget dårlig korrelation, hvilket igen bekræfter at de to parametre er påvirket af andre forhold end emissioner fra trafikken, men ikke ensartet (appendiks 10). Dette kan skyldes at partikler kan dannes sekundært i atmosfæren ved kemiske reaktioner.



Figur 4.32 Partikelfluxen i forhold til CO₂fluxen for time-middelværdier i januar.

Ud over en sammenligning af fluxene med trafikintensiteten, ville det have været optimalt, at kunne relatere koncentrationerne til højden af blandingslaget. Det var dog desværre ikke muligt at bestemme denne højde i dette projekt, da selv de mest simple modeller, anvender parametre, som det ikke var muligt at måle i dette projekt.

4.5.3 CO₂ og partikelmålinger i forhold til vindretninger

Der er i dette projekt ikke beregnet kildeområder. Usikkerheden på målingen af de parametre som modellerne anvender, som f.eks. ruhed og Monin Obukhov længde, er i dette forsøg meget høj, da der måles indenfor RSL. Kildeområdet størrelse er dog også afhængig af vindhastigheden, og målingerne er derfor relateret til denne (afsnit 2.5.1). Højere vindhastigheder vil resultere i et større kildeområde, samt i en større vertikal opblanding og et højere blandingslag.

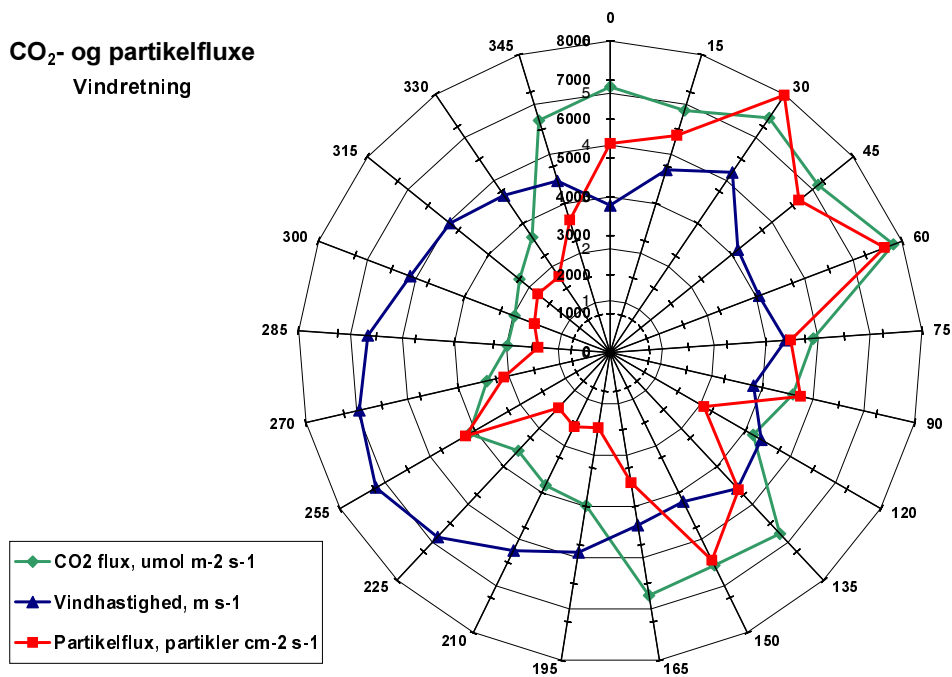
Målestationen er placeret midt i byområde, der er derfor ikke stor varians i arealanvendelse mellem de forskellige retninger, hvis man ser på en afstand i 1-1.5 km størrelsesordenen.

Hvis kildeområdet er i størrelsesordenen 100m-500m, er der dog en forskel, da Fælledparken og Nørre Allé i dette tilfælde vil dominere området 0-160 grader for HCØ, og boldbanerne fra Idrætsinstituttet vil dominere i retningen mod 160-270 grader (se evt. figur 3.1 over måleområdet).

CO₂ og partikel fluxe fordelt på vindretninger er vist i figur 4.33. De højeste værdier stammer fra retningen 0-160 for HCØ, hvilket indikerer at Nørre Allé påvirker målingerne, og at kildeområdet er forholdsvis lille.

Mod sydvest ses de højeste vindhastigheder, og dermed også større opblanding og større kildeområder. Jagtvej ligger på den anden side af boldbanerne i denne retning, ca. 300 m fra HCØ. Det ser ikke ud til at den trafikerede vej har påvirket målingerne i denne retning, og de maksimale bidrag til kildeområdet kan dermed formodes at komme fra boldbanerne. Hvis kildeområdet er forholdsvis lille, og dermed påvirket af området omkring Idrætsinstituttet, kan dette være medårsag til, at der måles lave fluxe i dette forsøg sammenlignet med Edinburg (Dorsey et al., 2003) og Stockholm (Mårtensson et al., 2003).

Se eventuelt appendiks 11 for figurer af CO₂ og partikel fluxe og koncentrationer.



Figur 4.33 CO₂ og partikel fluxe fordelt på vindretninger. Data fra de turbulensinfluerede vindretninger er frasorteret, men da værdierne på grafen angiver afrundet vindretninger, er der stadig målinger der hører ind under f.eks. 195 grader retningen (200-202.5 grader). De turbulensinfluerede områder er 90-120, 160-200 og 220- 260 grader.

4.6 Korrektioner til flux-beregninger

Det er umuligt at måle den fulde sande flux, selv med en direkte målemetode som eddykorrelationsmetoden. Alle målesystemer vil dæmpe den sande flux ved ikke at måle de meget høj- og lavfrekvente bidrag, ved filtrering pga. sensorseparationen, reaktionstiden for instrumenterne, dæmpning i slanger, og data-efterbehandling som detrending (Foken & Wichura, 1996; Massman og Lee, 2002). Alle er faktorer, der vil føre til en formindsket flux.

Også valget af midlings- og akserotationsperiode kan dæmpe fluxen. Der har de seneste år været diskussion omkring anvendelsen af akserotation foretaget på korte perioder, som f.eks. 30 minutter, kontra på lange perioder af f.eks. flere timer eller uger. Finnegan et al. (2003) fandt, at over høje canopier og komplekst terræn var de meget lavfrekvente bidrag til cospektret højere end forventet. En forøgelse af midlings og akserotationsperioden fra 15 min til 4 timer gav i dette tilfælde 30% højere energi-fluxe.

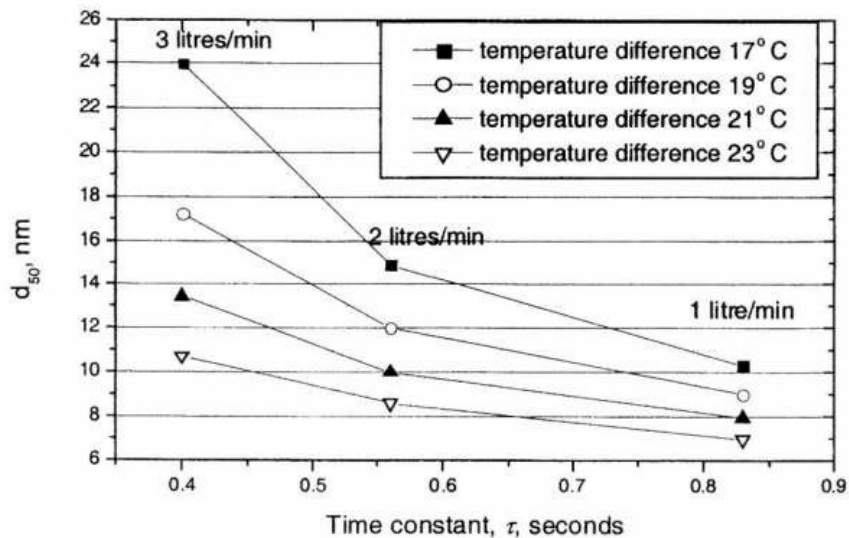
I dette forsøg er især dæmpningen i slagerne og CPC's reaktionstid et problem.

I de følgende afsnit vil størrelsen af denne dæmpning, samt mulighederne for at forbedre fremtidige målinger, blive diskuteret.

4.6.1 Dæmpning af signal i rør og CPC

Det blev i afsnit 3.4.7 bestemt vha. beregning af Reynolds tal, at strømmingen i røret er laminar, samt at der mistes gennemsnitligt ca. 18% af partiklerne ved diffusionstab. Størrelsen af dæmpningen af fluxen pga. det laminar flow kan derimod ikke umiddelbart bestemmes, men det er dog klart at dette er et problem ved fluxmålinger. Bøjningerne på kobberrøret kan have afhjulpet problemet en anelse, da en bøjning vil tilføre turbulens, når strømmingen skal igennem.

For at opnå turbulent strømning i røret skal flowraten øges væsentligt. Det vil desuden øge hastigheden hvormed prøven scannes i instrumentet, og dermed samtidigt mindske tidskonstanten i selve CPC (figur 4.34). Et for højt flow vil dog mindske detektions-effektiviteten i instrumentet, da partiklernes opholdstid i mætningskammeret samt ved detektions-laserstrålen, hermed mindskes (Buzorius, 2001). En forøgelse fra f.eks. 1 l.min⁻¹ til 3 l.min⁻¹ vil øge 50% detektionsstørrelsen fra ca. 10nm til 24nm ved en temperatur-forskel på 17 grader mellem mætnings- og kondensationskammeret (figur 4.34). Dette kan udbedres ved at øge temperaturforskellen, hvormed 50% detektionsstørrelsen falder. Ulempen ved en forøgelse af temperaturen er dog, at der kan opstå "spøgelsespartikler", dvs. at der registreres partikler selv ved 100% filtreret luft (Buzorius, 2001).



Figur 4.34 Forholdet mellem tidskonstanten for CPC 3010 og 50% detektionsstørrelsen ved forskellige flow i instrumentet, og temperaturforskelle mellem mætnings- og detektionskammer (Buzorius, 2001). Det ses at et øget flow vil mindske tidskonstanten, men øge 50% detektionsstørrelsen, hvilket kan udbedres ved en forøgelse af temperaturforskellen mellem mætnings- og detektionskammer.

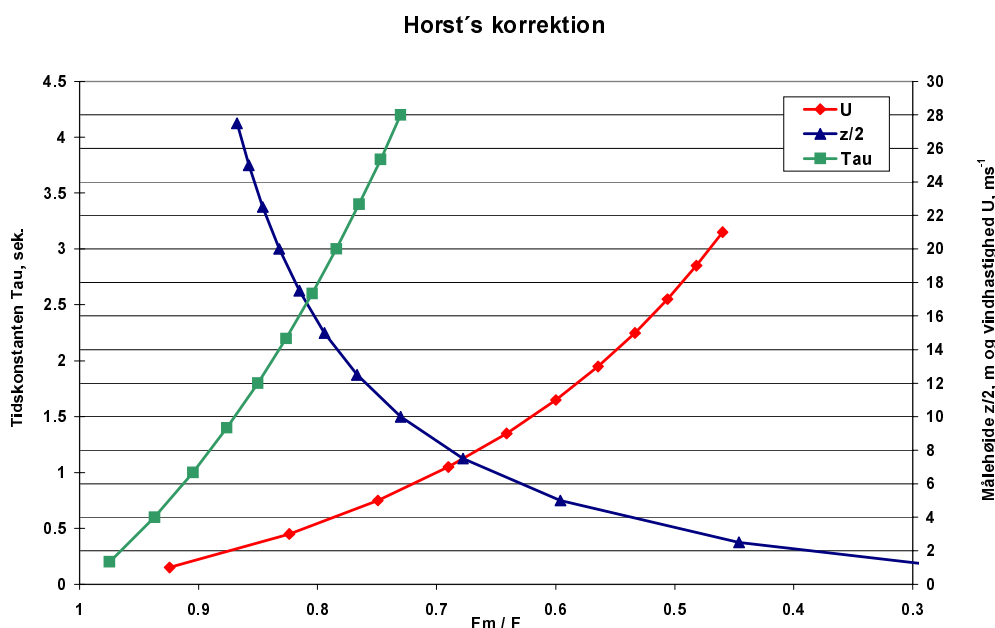
For partikelmålinger over København vil det være et problem at øge 50% detektionsstørrelsen til 24nm, da det maksimale bidrag af partikler er i størrelsesordenen 20-30nm (data fra DMU. Se figur 2.13 og 2.14). Det vil derfor være hensigtsmæssigt at anvende partikelstørrelsesfordelinger inden en fluxmåling, således at det kan bestemmes hvilket flow, der kan accepteres til forsøget. Partikelstørrelsesfordelingen ændrer sig desuden gennem døgnet, så det vil være nyttigt at vurdere ved hvilket tidspunkt, det er mest nødvendigt at måle koncentrationen præcist, og anvende partikelstørrelsesfordelinger herfra til at fastsætte den maksimale accepterede 50% detektionsstørrelse.

I dette forsøg ville det have været optimalt at tilføje en pumpe umiddelbart inden CPC med minimum 11 l min^{-1} flow (se afsnit 3.4.7), og en kritisk dyse herefter, således at flowet i røret blev holdt turbulent, mens flowet igennem selve instrumentet blev bevaret på maksimalt 3 l min^{-1} . Det ville være ideelt at øge flowet fra de nuværende 1 l min^{-1} til 3 l min^{-1} , således at tidsskonstanten blev mindre. Dette vil dog kræve at temperaturforskellen ligeledes blev øget, da 50% detektionsstørrelsen ellers vil være alt for stor ift. partikelstørrelsesfordelingen i København.

4.6.2 Horst's korrektion af flux

For at korrigere for den tabte flux pga. CPC's reaktionstid anvendes Horst's korrektion fra formel 3.12 for ustabile forhold, da gennemsnitlige z/L -værdier ligger under 0 (se figur 4.13).

Figur 4.35 viser en følsomhedsberegning for andelen af målt flux i forhold til faktisk flux ud fra formel 3.12. Ved beregningen af korrektionsfaktoren varieres Tau, z og U, ved at de to parametre holdes fast, mens den tredje varieres.



Figur 4.35 Forholdet mellem målt og faktisk flux ud fra Horst's formel for ustabile forhold. Korrektionen er relateret til vindhastighed, målehøjde og tidskonstanten.

Vindhastigheden er fastholdt på 4 m s^{-1} , da dette er den dominerende vindhastighed under målekampagnen (se afsnit 4.1.1). Målehøjden er fastholdt på 28 meter, og tidskonstanten på 3 sekunder (se afsnit 3.4.8).

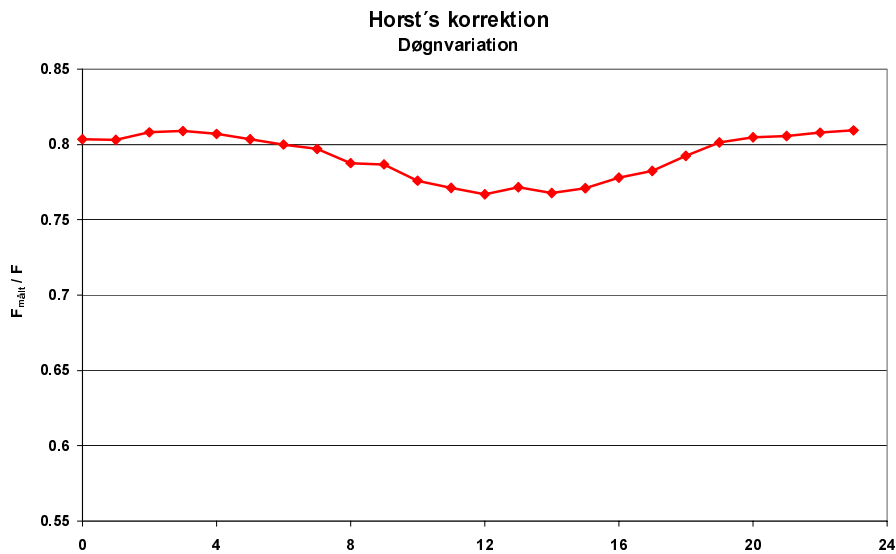
Det ses at korrektionen stiger med tidskonstanten og vindhastigheden, men falder med målehøjden. Denne dæmpning af korrektionen med øget målehøjde vil dog ikke være så stor ved faktiske målinger, da en øget målehøjde vil medføre højere vindhastigheder. Over målehøjden 3 gange $2\pi n_m \tau$ (formel 3.12) vil en øget højde medføre under 5% øget andel af målt flux. Den nuværende målehøjde på 28m ($5.7 * 2\pi n_m \tau$) er altså fuldstændig tilstrækkelig til fluxmålinger med den anvendte tidskonstant og de dominerende vindhastigheder.

Horst's korrektion anvender forudsætningen omkring placeringen af cospektrets top, hvilket er den største usikkerhed i forhold til anvendelsen ved dette forsøg. Beregningen af n_m forudsætter MO similaritetsteori, stationaritet og homogen overflade. Alle forudsætninger der ikke holder i RSL over et byområde.

Det er dog alligevel valgt at anvende korrektionen da de resterende parametre, Tau, z og U, er beregnet og målt korrekt. Det må derfor antages, at formlen giver et brugbart bud på størrelsesordenen af andelen af målt flux.

Den resulterende dæmpning af fluxen gennem døgnet ses i figur 4.36. Gennemsnits andelen af målt flux med det anvendte system er 79.7%, hvor de højeste andele af målt flux forekommer i nattetimerne.

Partikelfluxene i dette forsøg er dermed gennemsnitligt underestimeret med ca. 20%, pga. CPC's reaktionstid og forudsætningen omkring hvirvlernes størrelse ved den anvendte målehøjde og ved de målte vindhastigheder.



Figur 4.36 Gennemsnitlig døgnvariation af Horst's korrektionsfaktor beregnet ud fra formel 3.12 for ustabile forhold. Bemærk at y-aksen starter ved 0.55.

Horst's korrektion er anvendt i flere partikelflux-målinger. Held og Klemm (*in press*) anvender korrektionen på en opstilling med en gennemsnitlig Tau 0.87sek for deres målinger med 3760A CPC (1.5lmin⁻¹ flow). Dette resulterede i typiske korrektioner i størrelsesordenen 10-20%.

Også Pryor et al. (*in press*) anvender Horst's korrektion på en opstilling med en CPC 3010 over et skovområde. Her resulterer korrektionen i en gennemsnitlig underestimering på 13%.

4.7 Samlet vurdering af fejlkilder

Fluxmålinger er påvirket af mange fejlkilder, lige fra teoretiske forudsætninger der ikke opfyldes, til instrumentering og valg af databehandling der påvirker målingerne. Igennem projektet er der blevet gennemgået mange af disse fejlkilder, lige fra fejlkilder der påfører målingerne store usikkerheder, til fejlkilder der i dette tilfælde ikke gør den store forskel i målingerne fluxen. Dette skyldes at projektet er fokuseret på metoden. Det er derfor vigtigt at komme omkring alle aspekterne ved en partikelfluxmåling, for at klarlægge hvilke parametre man skal være opmærksom på, hvis metoden skal optimeres.

Tabel 4.3 viser en opsummeret gennemgang af fejlkilderne.

Lokaliteten	Byområde: Teoretiske forudsætninger til eddykorrelationmetoden som homogenitet og stationaritet bliver ikke opfyldt
	Måler indenfor RSL: Meget inhomogent, turbulens teorier kan ikke forudsættes af være gældende.
	Bygningen påvirker turbulensen: Stor forskel i turbulens alt efter vindretning. Nogle retninger frasorteres pga. bygningens effekt på turbulensen.
Opstillingen	Laminar flow i rør: Diffusionstab på koncentrationsmålingerne på gennemsnitligt 18%. Problemet påvirker også fluxene, da varians udglattes, men den konkrete størrelse af denne dæmpning er ikke kendt. Det er dog sikkert at dette er et problem ved målingen.
	Sensor separation: Dæmper kun hvirvler med en frekvens over 15min. Er ikke årsag til stor dæmpning.
Instrumenteringen	CPC, For lav maksimal målbar koncentration: De højeste værdier er ikke målt, og variationen er mistet på ½times målinger med gennemsnitlige koncentrationer over 17.000 partikler cm ⁻³ .
	CPC, Høj reaktionstid: Instrumentets høje reaktionstid førte til ca. 20% dæmpning ifølge Horst's ligning.
Databehandlingen	Midlingsperiode og akserotation: Det skulle være tilstrækkeligt med at midle og akseroterer over 30 min.'s perioder, men det er ikke testet. Toppen af U-spektret indikerer dog at dette ikke er årsag til store tab i flux. Akserotationen fjerner også al flux pga. advektion, hvilket antages at være 0. Dette er dog ikke sikkert, da der måles i et komplekst område.
	Detrending: Fjerner lavfrekvente bidrag. Dog ikke årsag til store tab i dette forsøg.

Tabel 4.3 Fejlkilder ved partikelfluxmålingerne i dette forsøg

5 Konklusion

Partikelfluxmålingerne er undersøgt ved en indledende analyse af rådata.

Koncentrationsmålingerne er sorteret for fejl og kraftige udsving, bl.a. ved sammenligning med målinger fra DMU, hvorefter ca. halvdelen af målingerne er frasorteret. Dette skyldes især hyppigt opstående fejl pga. vanddamp i instrumentet.

En spektralanalyse af målingerne af vindkomponenterne, samt koncentrationsmålinger af CO₂ og partikler blev anvendt til at undersøge data. Spektre af U og w udviste det forventede mønster ift. afhængighed af vindhastighed og hældning i intertiområdet. Det blev desuden konstateret at spektrene var forskellige alt efter vindretningen under målingen. Dette indikerede at taget påvirker turbulensen, således at målingerne er domineret af forskellige størrelser hvirvler alt efter vindretningen.

Spektre af CO₂ og partikeldata viste, at der tabes højfrekvent bidrag til målingerne. For partikelkoncentrationerne skyldes dette især tab pga. dæmning af koncentrationen, og af variationen i koncentrationen, i røret, og partikel-tællerens høje reaktionstid.

Tagets indflydelse på turbulensen blev videre undersøgt ved analyse af variansen i den vertikale vindkomponent, turbulensintensiteten, og friktionshastigheden. Dette bekræftede at taget påvirker turbulensen i visse retninger, og at målinger fra retningerne 100-120, 160-200 og 220-260 grader ikke var velegnet til at foretage fluxberegninger på.

Partikelmålingerne er relateret til CO₂ målinger, da de bør have samme variation gennem døgnet og året. CO₂ koncentrationsmålingerne følger den forventede døgnvariation med kraftig afhængighed af blandingslagets højde. Dette ses især, ved at koncentrationerne falder tidligere på morgenen i sommerperioden end i vinterperioden, og dermed følger tidspunktet for solopgang.

Partikelkoncentrationsmålingerne udviser ingen variation i sommerperioden, hvilket ikke kan forklares. Variationen i partikelkoncentrationerne i vinterperioden følger derimod samme variation som CO₂ koncentrationerne, og udviser de højeste niveauer i morgenmyldretiden ved lavt blandingslag. Partikelkoncentrationerne ligger gennemsnitligt på ca. 5000 partikler cm⁻³, hvilket er omtrent 3-4 gange lavere end niveauer målt i Edinburgh (Dorsey et al., 2002) og Stockholm (Mårtensson et al., 2003). Dette kan skyldes lavere emissioner i København og bedre vejrforhold for spredningen af emissionerne.

Partikelfluxene følger variationen i trafikken gennem døgnet og ugen, hvilket bekræfter at dette er hovedkilden til emissionerne. De højeste partikelfluxer på gennemsnitligt 8000 partikler cm⁻² s⁻¹ er målt i morgenmyldretiden i vinterperioden, hvilket må skyldes en øget mængde biler med koldstart, dårligere opblanding, og evt. langtransport af emissioner fra afbrænding, der er større i vinterperioden.

Niveauet på maks. 8000 partikler $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1}$ er næsten 10 gange lavere end målingerne fra Edinburgh og Stockholm, hvilket igen dels må forklares ved lavere emissioner og bedre vejrforhold, og dels ved at der tabes flux i systemet pga. opstillingen og instrumenteringen. For at relatere partikel- og CO_2 fluxene til trafikintensiteten er der opstillet en simple linær sammenhæng. Denne viste at fluxen af begge parametre er velkorreleret med trafikintensiteten, med den højeste korrelation for målinger i vinterperioden. Partikelfluxen havde en korrelationskoefficient med trafikintensiteten i sommerperioden på 67% og i vinterperioden på 77%. Korrelationen mellem CO_2 og partikelfluxene i vinterperioden var på 0.8, hvilket viser at de to parametre i høj grad afhænger af den samme kilde og de samme spredningsmekanismer.

Dette ses også i, at både CO_2 og partikelfluxene er højest fra de nordøstlige til sydøstlige retninger, hvor Nørre Allé løber. Begge fluxe er derimod lave mod sydvest, hvor der er boldbaner i afstanden 0 til ca. 300m. fra masten. I 300m's afstand i denne retning ligger Jagtvej. Dette kunne indikere et meget lille kildeområde, og at målingerne kun er gældende for området omkring taget af HCØ.

Instrumenteringen og opstillingen har ikke været optimal for en partikelfluxmåling. Det er konstateret at strømmingen i røret har været laminar, og at der er tabt ca. 18% af partiklerne til diffusion i røret. Variationen i koncentrationerne er desuden blevet dæmpet som følge af laminar strømning i røret. Tabet i variationen, og dermed fluxen, kan ved fremtidige målinger med en lignende opstilling, sænkes ved at øge flowet i røret til 11 l min^{-1} , således at strømmingen er turbulent.

I forhold til instrumenteringen var det et problem, at CPC har meget høj reaktionstid. Dette kan ved fremtidige målinger udbedres ved øge flowet i instrumentet til 3 l min^{-1} . Derved øges detektionsstørrelsen, hvilket kan udbedres ved at øge temperaturforskellen mellem mætnings- og detektionskammer.

Opstillingen blev placeret på taget af HCØ af praktiske årsager pga. kravet til opbevaringen af CPC. Dette er dog lagt fra optimalt pga. bygningens effekts på turbulensen. Det er dog ikke usædvanligt at målinger i byområder foretages under forhold der ikke er optimale, da det sjældent er muligt at opstille master og instrumentopbevaring på ideelle lokaliteter.

Trods dette har resultaterne af partikelfluxmålinger udvist den forventede varians med trafikken og med CO_2 målingerne. Det er derfor muligt at måle partikelflux i et byområde, men målingerne ville være bedre fra en lokalitet uden turbulenseffekt fra taget, samt med de omtalte korrektioner til instrumenteringen.

6 Perspektivering

Danmark har forholdsvis ren luft ift andre europæiske lande. Dette skyldes lave emissioner, pga. lav befolkningstæthed, regulering og ingen sværindustri, samt et gunstigt klima. Vi har mange vandrede lavtryk fra vest og sydvest der medfører ren luft og friske vinde der fjerner lokal forurening. Da vi er et fladt land, får vi heller ikke problemer med ophobning af dale, som andre lande oplever (Palmgren et al., 1997). Også de indre farvande hjælper os til at holde luften ren, da meget forurening optages her (Fenger, 1997). Men ren luft er ikke noget vi kan tage for givet, er vedvarende. Luftforurening skal forebygges. I modsætning til vand og jord-forurening kan luften ikke indsamles og renses igen. Så snart stofferne er frigivet i atmosfæren spredes og transporteres de. Fordelen ved dette er selvfølgelig at forureningen sjældent ophobes, men netop derfor må forbedringer af luftkvaliteten altid være præventive.

Luftforureningen kan forebygges ved at mindske grænseværdier, ved økonomiske styringsmidler som f.eks. grønne afgifter, og ved planlægning og information til befolkningen,- alle tiltag til at sænke emissionerne. Nedsættelse af partikelemissionerne kan ske ved påsætning af filtre og katalysatorer på bilerne, bedre udnyttelse af brændselsenergi, renere brændsler, mindre forbrug osv. (Palmgren et al., 1997).

Tiltag indenfor byplanlægning kan forbedre befolkningens sundhed, og mindske generne ved forureningen i byerne, ved at øge afstanden mellem kilderne til forureningen og især de udsatte grupper, som f.eks. børn. For at lette denne form for byplanlægning kan AIRGIS programmet (Jensen et al., 2001) fra DMU muligvis hjælpe i fremtiden. Dette program udregner eksponeringsgrader ud fra databaser for antal beboere på adresserne, opholdstider, alder, emissioner osv.

Nye undersøgelser peger på at brændeovne er årsag til partikelforurening i villakvarterer, der på vindstille dage er på niveau med de kraftigst trafikerede veje i København- En nyhed der især fandt vej til pressen (Politiken, 21/8-'05, Metro Express 16/1-'06).

Også regeringen har reageret på problemet med partikelforureningen.

Finansloven 2006 giver miljøministeriet en ekstra milliard, samt en række tiltag som skal finansieres ud over dette, heriblandt afgiftsfrihed på partikelfiltre (brev fra Connie Hedegaard til ministerierne 14/11-'05). Dette indikerer at regeringen tager problemet med partiklerne seriøst, og prioriterer en løsning.

Det er dog vigtigt at dette nye fokus på partikelforurening følger den nye viden omkring partikelstørrelsesfordelingerne, og anerkender behovet for at måle partikler i antal, såvel som vægt, og at sætter grænseværdier for antals-koncentrationerne. Selv i 2003 har Miljøkontrollen gennemført en partikelmåling af vægt og ikke antal. (Partikler i luften, Rapport fra Miljøkontrollen, Københavns kommune 2004).

For at bestemme emissionerne er det vigtigt at foretage målinger af partikelfluxen. Men fluxmålinger i byområder er stadig en videnskab i kraftig udvikling, med mange spørgsmålstejn og udfordringer.

Fluxmålinger verden over er samlet for at udveksle viden, erfaring og for at globalisere resultaterne for at få det meste ud af dem. F.eks. FLUXNET, AmeriFlux, CarboEurope, og AsiaFlux er netværk af forskere verden over, der udveksler resultater og erfaringer. Især internationale institutioner som ACCENT (Atmospheric composition change. The European network of excellence) og det nordiske BACCI (Biosphere-Aerosol-Cloud-Climate Interactions) har fokus på partikelmålinger, og netop nu er et netværk af forskere under BACCI ved at samle data og viden om partikelfluxmålinger, for at sammenligne fremgangsmåder. Dette indikerer hvor lidt viden der stadig er indenfor området, og at det er nødvendigt at sammenligne erfaringer på tværs af landegrænser, for at etablere en optimal målemetode og dataefterbehandling. Data indsamles i de næste måneder til præsentation på en konference under BACCI i maj måned (mail fra Sara Pryor, Risø / Indiana University, 5/1-'06).

De største udfordringer til partikelfluxmålingerne i fremtiden bliver netop denne udvikling af målemetoden, samt ved bymålingerne en bedre forståelse for fluxmålinger i komplekse områder.

Dette emne har netop været i fokus på en international konference for forskere i Colorado under iLEAPS (the Integrated Land Ecosystem – Atmosphere Processes Study).

Forbedringer af selve målestationerne vil også medvirke til bedre resultater. Målinger i byområder er typisk tvunget til at blive foretaget fra allerede etablerede installationer, og bliver derfor ikke placeret optimalt.

Disse forbedringer indenfor målemetoder sker netop nu, og partikelfluxmålinger vil blive kraftigt forbedret indenfor de næste år. Forhåbentligt vil denne nye viden række sig helt til EU, og blive omdannet til ny lovgivning.

7 Tak til

Man kommer ikke gennem et speciale uden at være taknemmelig til en række mennesker, der har ydet deres tid, støtte og faglige ekspertise.

Her er en række af de personer og institutioner som jeg vil takke for at have hjulpet mig gennem projektet;

- ATMI afdelingen på DMU for lån af mast, CPC, samt data fra deres målinger og ikke mindst en plads i afdelingen.
- Bjarne Jensen, ATMI, DMU. Tak for maste-kravling, hjælp til vedligeholdelse af CPC og ikke mindst psykisk støtte, når instrumenterne rottede sig sammen mod mig.
- Eiko Nemitz, CEH, Edinburgh. Tak for gæstfrihed på centeret ved mit besøg, bekræftelse af mine data, vejledning i partikelflux-efterbehandling og introduktion til præprocesseringen af data i EDIRE-programmet.
- Lotte Sørensen, RISØ. Tak for uundværlig hjælp til beregninger af spektre og udlån af program. Også en stor tak for din interesse i projektet, og opbakning undervejs, samt hjælp til redigering.
- Sven-Erik Gryning, RISØ. Tak for din interesse i projektet samt materiale og gode råd indenfor bestemmelse af blandingslaget.
- Ruwim Berkowicz, ATMI, DMU. Tak for faglige pædagogiske forklaringer og introduktion til programmeringens vidunderlige verden (Visual Basic = Lego for voksne)
- Og ikke mindst min vejleder på Geografisk Institut, Henrik Søgaard, som igangsatte projektet og så mulighederne i partikelfluxmålinger.

8 Litteratur

Baklanov, A. (2001). "The mixing height in urban areas- a review", In: **Mixing height and inversions in urban areas.**, Proceedings of the workshop, 3-4 october 2001 Toulouse, France, pp 9-28

Batchvatova, E., Gryning, S. E. (2005). "Progress in urban dispersion studies", **Theoretical and applied climatology**, online september 2005

Berger, B.W., K.J. Davis, P.S. Bakwin, C. Yi and C. Zhao (2001). "Tall-tower observations of carbon dioxide fluxes over a northern forest: Flux measurement methodology." **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology** 18, pp 529-542.

Buzorius, G., Rannik, Ü., Mäkelä, J. M., Vesala, T., Kulmala, M. (1998). "Vertical aerosol particle fluxes measured by eddy covariance technique using condensational particle counter." **Journal of Aerosol Science**, vol. 29, pp 157-171

Buzorius, G. (2001). "Cut-off sizes and time constants of CPC TSI 3010 operating at flow rates from 1 to 3 lpm. Flow rates." **Aerosol Science and Technology**, 35, pp 577-585.

Dockery, D. W. (2001). "Epidemiologic evidence of cardiovascular effects of particulate air pollution." **Environmental Health Perspective** 109, pp 483-486

Donaldson, K., Stone, V., Seaton, A., MacNee, W. (2001). "Ambient particle inhalation and the cardiovascular system: Potential mechanisms.", **Environmental Health Perspective** 109, suppl. 4, pp 523-527

Dorsey, J. R., Nemitz, E., Gallagher, M. W., Fowler, D, Williams, P. I., Bower, K. N. , Beswick, K. M. (2002). "Direct measurements and parameterisation of aerosol flux, concentration and emission velocity above a city.", **Atmospheric Environment** nr 36, pp 791-800

Fenger, J. (1997). "En atmosfære med voksende problemer.", **DMU tema-rapport nr 11**, Miljø og Energiministeriet, Danmarks miljøundersøgelser.

- Fenger, J. (1999). "Urban air quality.", **Atmospheric Environment**. 33, pp. 4877-4900.
- Finnegan, J. J., Clement, R., Malhi, Y., Leuning, R., Cleugh, H. A. (2003). "A re-evaluation of long-term flux measurement techniques, part I: Averaging and coordinate rotation.", **Boundary-Layer Meteorology**, 107, pp. 1-48
- Foken, Th., Wichura, B. (1996). "Tools for quality assessment of surface-based flux measurements.", **Agricultural and Forest Meteorology** 78, pp 83-105.
- Grelle, A. (1997). "**Fluxes from a boreal forest: Methods and applications.**", Doctor's dissertation, Acta Universitatis Agriculturae Sueciae, ISBN 91-576-5312-7
- Gryning, S. E. (2005). "**The height of the atmospheric boundary layer during unstable conditions.**", Risø National Laboratory. Risø-R-1536(EN)
- Gryning, S. E., Batchvarova, E. (1996). "A model for the height of the internal boundary layer over an area with an irregular coastline.", **Boundary layer meteorology**, 78, pp 405-413
- Held, A. Klemm, O. (in press). "Direct measurement of turbulent particle exchange with a twin eddy covariance system.", Submitted to; **Atmospheric Environment**.
- Haeger-Eugensson, M. (1999). "**Atmospheric stability and the interaction with local and meso-scale wind systems in an urban area**". Department of Earth Sciences, Göteborg Universitet.
- Hinds, W. C. (1999). "**Aerosol technology. Properties, behavior, and measurement of airborne particles.**", Kapitel 2, "Properties of gasses", Kapitel 7, "Brownian motion and diffusion", Kapitel 14, "Atmospheric Aerosol", John Wiley and sons, inc.
- Horst, T. W. (1997). "A simple formula for attenuation of eddy fluxes measured with first order response scalar sensors.", **Boundary-Layer Meteorology**, 82, pp. 219-233
- Horst, T. W., Weil, J. C. (1992). "Footprint estimation for scalar flux measurements in the atmospheric surface layer.", **Boundary-Layer Meteorology** 59, pp 279-296

Idso, S. B., Idso, C. D., Balling, R. C. Jr. (2002). "Seasonal and diurnal variations of near-surface atmospheric CO₂ concentration within a residential sector of the urban CO₂ dome of Phoenix, AZ, USA.", **Atmospheric Environment** 36, pp 1655-1660.

IPCC, 5. Co-ordinating Lead Author; Penner, J. E. (2001). "Aerosols, their Direct and Indirect Effects",

Climate Change 2001, IPCC Third assessment report; The Scientific Basis, Chapter 5, pp 289-348

IPCC, 3. Co-ordinating Lead Author; Prentice, I. C.. (2001). "The carbon cycle and atmospheric carbon dioxide", **Climate Change 2001, IPCC Third assessment report; The Scientific Basis**. Chapter 3, pp183-237

Jensen, S. S., Berkowicz, R., Hansen, H. S., Hertel, O. (2001). "A Danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures". **Transportation Research part D**, 6, pp 229-241.

Kaimal, J. C., Wyngaard, J. C., Izumi, Y., Coté, O. R. (1972). "Spectral characteristics of surface-layer turbulence". **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. 98, pp. 563-589.

Ketzel, M., Wåhlin, P., Berkowicz, R., Palmgren, F (2003). "Particle and trace gas emission factors under urban driving conditions in Copenhagen based on street and roof-level observations.", **Atmospheric environment** 37, pp 2735-2749. Elsevier.

Lee, X., Massman, W., Law, B (2004). "**Handbook of micrometeorology- A guide for surface flux measurement and analysis.**", Anvendte kapitler: 1: Law, B., Verma, S., 2: Moncrieff, J., Clement, R., Finnigan, J., Meyers, T., 3 :Lee, X., Finnigan, J., Tha Paw U, K. Kluwer academic publishers

Massman, W. J., Lee, X. (2002). "'Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchange.", **Agricultural and Forest Meteorology**, no 113, pp 121-144

Mårtensson, E. M., Buzorius, G., Nilsson, B. D., Johansson, C. (2003). "Emissions of aerosol particles in the urban environment measures by eddy correlation.", **Abstracts of the European Aerosol Conference**

- Moore, C. J. (1986). "Frequency response corrections for eddy correlation systems.", **Boundary-Layer Meteorology**, 37 pp. 17-35.
- Møller, S. D. (2003). "**Anvendelse af GIS i et mikroklimatologisk studie af et bymiljø.**", Specialeafhandling i naturgeografi, Geografisk Institut, Københavns Universitet.
- Nemitz, E., Hargreaves, K. J., McDonald, A. G., Dorsey, J. R., Fowler, D. (2002). A "Micrometeorological measurements of the urban heat budget and CO₂ emissions on a city scale.", **Environmental Science & Technology** 36, pp 3139-3146
- Nemitz, E., Gallagher, M. W., Duyzer, J.H., Fowler, D. (2002) B, "Micrometeorological measurements of particle deposition velocities to moorland vegetation.", **Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society**. nr 128, pp. 2281-2300
- Oke, T.R. (1987). "**Boundary layer climates.**", Second edition. Anvendte kapitler; 2, 8 og 9, samt appendices , Routledge.
- Palmgren, F., Berkowicz, R., Jensen, S. S., Kemp, K. (1997). "Luftkvalitet i danske byer.", **DMU tema-rapport nr 16**, Miljø og Energiministeriet, Danmarks miljøundersøgelser
- Panofsky, H. A., Dutton, J. A. (1984). "**Atmospheric turbulence- Models and methods for engineering applications.**", Anvendte kapitler 1: The wind and atmospheric turbulence, 6: Profiles and fluxes in the surface layer, 8: Spectral statistics of turbulent fluctuations at fixed locations. John Wiley & Sons, Inc.
- Piringer M., Baklanov A., Burzynski J., De Ridder K., Deserti M., Joffre S., Karppinen A., Mestayer P., Middleton D.R., Tombrou M., Vogt R., Christen A. (2004). "The urban surface energy budget and the mixing height: Some results of recent European experiments stimulated by the COST - Action 715.", *9th International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes*, Garmisch- Partenkirchen, Germany, June 1-4, 2004
- Pryor, S. C., Larsen, S. E., Sørensen, L. L ., Barthelmie, R. J.. (*in press*), "Particle fluxes above forests: Observations, methodological considerations and method comparisons.", Indsendt til "**Environmental Pollution**", ACCENT flux workshop special issue.

Raupach, M. R., Finnigan, J. J., Brunet, Y. (1996). "Coherent eddies and the turbulence in vegetation canopies: The mixing layer analogy.", **Boundary layer meteorology**, 78, pp 351-382.

Rotach, M. W. (1999) "On the influence of the urban roughness sublayer on turbulence and dispersion", **Atmospheric Environment** vol 33, nr 24, pp 4001-4008.

Roth, M. (2000). "Review of atmospheric turbulence over cities", **Q. J. Royal Meteorological Society**, vol. 126, Part A, no. 564, pp 941-991

Ruuskanen, J., Tuch, Th., Brink, H. T., Peters, A., Khlystov, A., Mirme, A., Kos, G. P. A., Brenekreef, H.E., Wichmann, H. E., Buzorius, G., Vallius, M., Kreyling, W. G., Pekkanen, J. (2001). "Concentrations of ultrafine, fine and PM_{2.5} particles in three European cities.", **Atmospheric Environment** 35, pp. 3729-3738

Schwartz, J., Gary, N., Larson, T., Sheppard, L., Claiborne, C., Koenig, J. (1999). "Episodes of high coarse particle concentrations are not associated with increased mortality.", **Environmental Health Perspectives**, Volume 107, nr 5.

Schmid, H. P. (1994). "Source areas for scalars and scalar fluxes.", **Boundary-Layer meteorology** 67 pp 293-318

Schuepp, P. H., Leclerc, M. Y., MacPherson, J. I., Desjardins, R. L. (1990). "Footprint prediction of scalar fluxes from analytical solutions of the diffusion equation.", **Boundary-Layer meteorology**, 50, pp 355-373.

Shi, J. P., Evans, D. E., Khan, A. A., Harrison, R. M. (2001). "Sources and concentration of nanoparticles (<10nm diameter) in the urban atmosphere.", **Atmospheric Environment** 35, pp 1193-1202

Soegaard, H., Lindroth, A., Jensen, N. O., Anderberg, S. (2002). "CO₂ budget i et ekspanderende bymiljø på tværs af Øresund.", **På jagt efter Øresundsregionen- Tankar och slutsatser från ett mångvetenskapligt forskningsprogram.**, Öresundsuniversitetet, pp 77-89.

Soegaard, H., Møller-Jensen, L. (2003). "Towards a spatial CO₂ budget of a metropolitan region based on textural image classification and flux measurements.", **Remote Sensing of Environment** 87, pp 283-294

Sokhi, R., Luhana, L., Kukkonen, J., Berge, E., Slördal, L. H., Finardi, S. (2001). "Analysis of airpollution episodes in European cities.", In: **Mixing height and inversions in urban areas**. Proceedings of the workshop, 3-4 october 2001 Toulouse, France, pp 65-74

Solvang Jensen, S., Berkowicz, R., Hansen, H. S., Hertel, O. (2001). "A danish decision-support GIS tool for management of urban air quality and human exposures.", **Transportation Research Part D**, Volume 6, Issue 4, pp 229-241. Elsevier.

Stull, R. B. (1988). "**An introduction to Boundary Layer Meteorology**.", Anvendte kapitler; 1: Mean boundary layer characteristics, 2: Some mathematical and conceptual tools: Part 1. Statistics, 3: Applications of the governing equations to turbulent flow, 7: Boundary conditions and external forcings, 8: Some mathematical and conceptual tools: Part 2. Time series, 9: Similarity Theory, 14: Geographic effects. Kluwer Academic Publishers

Viuf, P., Søgaard, H. (2004). „The role of particle and CO₂ emission in urban environment within the Øresund Region”, Geograferns forskningsbidrag til det Øresundsregionale udviklingsprojekt., **Kulturgeografiske skrifter**, bind 14, pp 105-125, C. A. Reitzels Forlag.

Referencer fra internettet

www.miljoe.kk.dk 1, <http://www.miljoe.kk.dk/faa80d22-9444-491f-b00b-d32ca959c6ee.W5Doc>

www.sk.kk.dk 1: <http://www.sk.kk.dk/data2005/orientering/Ori0506.pdf>

www.dmi.dk 1, http://www.dmi.dk/dmi/danmark_ramt_af_landsdaekkende_storm

www.dmu.dk Description of the OSPM model.

www.dmu.dk 1; www.dmu.dk/Luft/Ultrafine+partikler

www.vajpark.kk.dk 1 ; http://www.vejpark.kk.dk/publikationer/pdf/391_tallerapport2004.pdf

Symbol liste

C:	Koncentration.
d :	Nulplansforskydningsfaktoren.
$d_{\text{rør}}$:	Diameteren af røret
D:	Diffusionskoefficienten
DMU:	Danmarks Miljø Undersøgelser
F:	Faktisk flux
F_m :	Målt flux
f:	Frekvens, 1/s.
GI:	Geografisk Institut
$I_{u,v,w}$:	Turbulensintensiteten af u, v eller w.
k :	Von Karmans konstant; 0,4.
$L_{\text{rør}}$:	Længden af kobberrøret
L:	Monin Obukhov længde
n:	Antal observationer
Re:	Reynolds tal
RSL:	Roughness Sublayer
S:	Stationaritetsprocent
T :	Temperatur, grader Celcius.
u:	Horisontal vindkomponent.
U:	Resulterende horisontal vindhastighed.
w :	Vertikal vindkomponent.
v :	Lateral vindkomponent.
V:	Luftens hastighed i røret
Q:	Volumen strømning i rør
Q_H :	Sensibel varme flux.
u^* :	Friktionshastigheden.
\bar{x} :	Middelværdi af variabel
z :	Målehøjde over jordoverfladen.
z_0 :	Ruhedsparameteren.
σ :	Standardafvigelse
ρ :	Luftens densitet.
ζ :	Stabilitetsfaktor.
μ :	Den dimensionsløse depositionsparameter
v:	Luftens molekylære viskositet
τ :	Tau, tidskonstanten for CPC

Appendiks

<i>Appendiks nr.</i>	<i>Beskrivelse</i>
Appendiks 1	Udskrift af Matlab program til beregning af spektre.
Appendiks 2	Udskrift af EdiRe input- og processerings lister.
Appendiks 3	Plot af lagtime ved maksimum korrelation. Alle data undtagen juni (figur 3.11).
Appendiks 4	Diffusionskoefficienten, D
Appendiks 5	Alle anvendte partikelmålinger fra GI og DMU målinger fra samme perioder.
Appendiks 6	Alle anvendte CO ₂ målinger.
Appendiks 7	Spektre for 17 min og 136 minutter datasekvenser.
Appendiks 8	Plot af globalstråling, målt af DMU
Appendiks 9	Plot af alle partikelfluxmålinger
Appendiks 10	Plot af partikelflux / CO ₂ flux- sommer
Appendiks 11	Plot af partikel- og CO ₂ koncentrationer og fluxe ift. vindretning.

Appendiks 1

*Udskrift af Matlab program til beregning af spektre, udlånt af Lise-Lotte Sørensen, Risø.
Eksempel på beregning af U spektret for 14/6 starttidspunkt kl.11.03, 4Hz datainput:*

```
clear
o=1;
```

```
[A]=load(['D:/Analyse/particle/PIA/1411030.dat']);
```

```
X=A(:,1);
%Temp_m(i)=mean(Temp)
U=A(:,7);
W=A(:,3);
CO2=A(:,4);
N=A(:,5);
%[n,m]=size(A)
%d(i)=d
clear A
```

```
c=[U];
x=[X];
```

```
%ni=-3;
%nj=0;
```

```
%for iii=1:35996
%ni=ni+4;
%nj=nj+4;
%p=1;
% for ii = ni:nj
%   cii(p)=c(ii);
%   p=p+1;
% end
%c_mean=mean(cii);
%clear cii
%ki=iii
%end
```

```
conc=fft(c,2^14);
u=fft(x,2^14);
conc(1)=[];
u(1)=[];
```

```
langc=length(conc)+1;
power2=(abs(conc).^2)/langc;
power3=(abs(u).^2)/langc;
powerc=power2(1:langc/2);
```

```

powerws=power3(1:langc/2);
nyquist=1/2;
%frequ=20*(1:langu/2)/langu;
freqc=4*(1:langc/2)/langc;
freq2c=freqc';
fSc=powerc.*(freq2c/4);
fSu=powerws.*(freq2c/4);
%loglog(freq2,fS);

m=0;
i=0;
j=0;
C1=[];
C2=[];
C3=[];
k=2;
n=1;
l=1;

while k<langc/2
    i=i+1; j=j+1; C1(i)=mean(freq2c(n:k));
    C2(j)=mean(fSc(n:k));
    C3(j)=mean(fSu(n:k));
    %C4(j)=mean(fSv(n:k));
    %C5(j)=mean(fSc(n:k));
    n=1+k; m=round(2^(l)); k=n+m; l=l+0.15;
end

C1_ny=C1';
C2_ny=C2';
C3_ny=C3';
%spec_mid=[C1_ny,C2_ny];
%length(C1);

figure(o)
loglog(C1_ny,C2_ny,'r--');
%axis([0.0001 10 0.00001 0.01])
xlabel('[Hz]')
ylabel('fS []')
title([' power-spectrum'],FontSize,10)
OUT1 = [C1_ny,C2_ny];
fssf = OUT1(38,2);
OUT2 = [C1_ny,C3_ny];
fsuf = OUT2(38,2);
%sonic_u=wind_speed(X,Y,Z)
s = ['D:/analyse/particle/PIA/power14U141103.dat'];
dlmwrite(s,OUT1);

```


Appendiks 2

EdiRe RawFileFormat liste (definerings af inputdata):

Record Size (Bytes)

Location = Given
Position =
Format =
Size =
Value = 49

Sampling Rate (sec)

Location = Given
Position =
Format =
Size =
Value = 0.25

Record Structure

Channel # = 1
Position = 0
Format = Binary Characters
All Channels =
Character Size = 7

Record Structure

Channel # = 2
Position = 8
Format = Binary Characters
All Channels =
Character Size = 7

Record Structure

Channel # = 3
Position = 16
Format = Binary Characters
All Channels =
Character Size = 7

Record Structure

Channel # = 4
Position = 24
Format = Binary Characters
All Channels =
Character Size = 7

Record Structure

Channel # = 5
Position = 32
Format = Binary Characters
All Channels =
Character Size = 7

Record Structure

Channel # = 6

Position = 40
Format = Binary Characters
All Channels =
Character Size = 7

Starting Month

Location = Given
Position =
Format =
Size =
Value = 5

Starting Day

Location = Filename
Position = 1
Format =
Size = 2
Value =

Starting Hour

Location = Filename
Position = 3
Format =
Size = 2
Value =

Starting Minute

Location = Filename
Position = 5
Format =
Size = 2
Value =

Starting Year

Location = Given
Position =
Format =
Size =
Value = 2004

EdiRe ProcessingList (definerings af beregninger og output). Eksempel på beregning for data fra september:

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 1
Label for Signal = U

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 2
Label for Signal = V

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 3
Label for Signal = W

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 4
Label for Signal = C

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 5
Label for Signal = N

Extract

From Time =
To Time =
Channel = 6
Label for Signal = T

Linear

From Time =
To Time =
Signal = C
1st Offset = 100
1st Gain = 140
1st Curvature = 0
2nd Offset = 0
2nd Gain = 1
2nd Curvature = 0

Linear

From Time =
To Time =
Signal = N
1st Offset = 0
1st Gain = 4000

1st Curvature = 0
 2nd Offset = 0
 2nd Gain = 1
 2nd Curvature = 0

Linear

From Time =
 To Time =
 Signal = T
 1st Offset = 0
 1st Gain = 100
 1st Curvature = 0
 2nd Offset = 0
 2nd Gain = 1
 2nd Curvature = 0

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = U
 Storage Label Mean = mean rawU
 Storage Label Std Dev = U Std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = V
 Storage Label Mean = mean rawV
 Storage Label Std Dev = V Std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = W
 Storage Label Mean = mean rawW
 Storage Label Std Dev = W Std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =

Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =

Wind direction

From Time =
 To Time =
 Signal (u) = U
 Signal (v) = V
 Orientation = 330
 Wind Direction Components = U+S_V+E
 Wind Direction Output = N_0_deg-E_90_deg
 Storage Label Wind Direction = Wind_dir
 Storage Label Wind Dir Std Dev = Wind dir Std dev

Rotation coefficients

From Time =
 To Time =
 Signal (u) = U
 Signal (v) = V
 Signal (w) = W
 Storage Label Alpha = alpha
 Storage Label Beta = beta
 Storage Label Gamma =
 Optional mean u =
 Optional mean v =
 Optional mean w =

Rotation

From Time =
 To Time =
 Signal (u) = U
 Signal (v) = V
 Signal (w) = W
 Alpha = alpha
 Beta = beta
 Gamma =
 Do 1st Rot = x
 Do 2nd Rot = x
 Do 3rd Rot =

Cross Correlate

From Time =
 To Time =
 Signal = W
 Signal which lags = C
 Correlation type = Correlation
 Output Correlation curve = correlationcurveC
 Storage Label Peak Time = lag_C
 Storage Label Peak Value = peak correlation C/W

Cross Correlate

From Time =

To Time =
 Signal = W
 Signal which lags = N
 Correlation type = Correlation
 Output Correlation curve = correlationcurveN
 Storage Label Peak Time = lag_N
 Storage Label Peak Value = Peak correlation N/W

Remove Lag

From Time =
 To Time =
 Signal = N
 Min Lag (sec) = 20
 Lag (sec) = Lag_N
 Max Lag (sec) = 24
 Below Min default (sec) = 22.5
 Above Max default (sec) = 22.5

Remove Lag

From Time =
 To Time =
 Signal = C
 Min Lag (sec) = 2
 Lag (sec) = lag_C
 Max Lag (sec) = 3.5
 Below Min default (sec) = 2.625
 Above Max default (sec) = 2.625

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = U
 Storage Label Mean = Mean U
 Storage Label Std Dev = Mean U Std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = V
 Storage Label Mean = Mean V
 Storage Label Std Dev = Mean V Std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = W

Storage Label Mean = Mean W
 Storage Label Std Dev = Mean W Std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = C
 Storage Label Mean = Mean C
 Storage Label Std Dev = C std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = N
 Storage Label Mean = Mean_N
 Storage Label Std Dev = N std dev
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =

1 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = T
 Storage Label Mean = T
 Storage Label Std Dev = Std dev T
 Storage Label Skewness =
 Storage Label Kurtosis =
 Storage Label Maximum =
 Storage Label Minimum =
 Storage Label Variance =
 Storage Label Turbulent Intensity =
 Alt Turbulent Intensity Denominator =

Filter - detrend

From Time =
 To Time =
 Signal = N
 Remove mean only =

Filter - detrend

From Time =
 To Time =
 Signal = C
 Remove mean only =

2 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = W
 Signal = T
 Storage Label Covariance = cov_wT
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux = Qh
 Flux coefficient = 1200

2 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = W
 Signal = N
 Storage Label Covariance = cov_wN
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux = Flux_wN
 Flux coefficient = 100

2 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = U
 Signal = W
 Storage Label Covariance = cov_uw
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux =
 Flux coefficient =

2 chn statistics

From Time =
 To Time =
 Signal = W
 Signal = C
 Storage Label Covariance = cov_wC
 Storage Label Correlation =
 Storage Label Flux = Flux_C
 Flux coefficient = 45.17

U star

From Time =
 To Time =
 Storage Label = UStar
 Apply to =
 Apply by =
 uw covariance (m2/s2) = cov_uw
 Min or QC =
 Max or QC =

Stationarity

From Time =
 To Time =
 Signal (A) = W

Signal (B) = C
Storage Label A StdDev Stationarity =
Storage Label B StdDev Stationarity =
Storage Label AB Covariance Stationarity = stat_C
Segment length, minutes = 5
Linear detrend segments =
Linear detrend run =

Stationarity

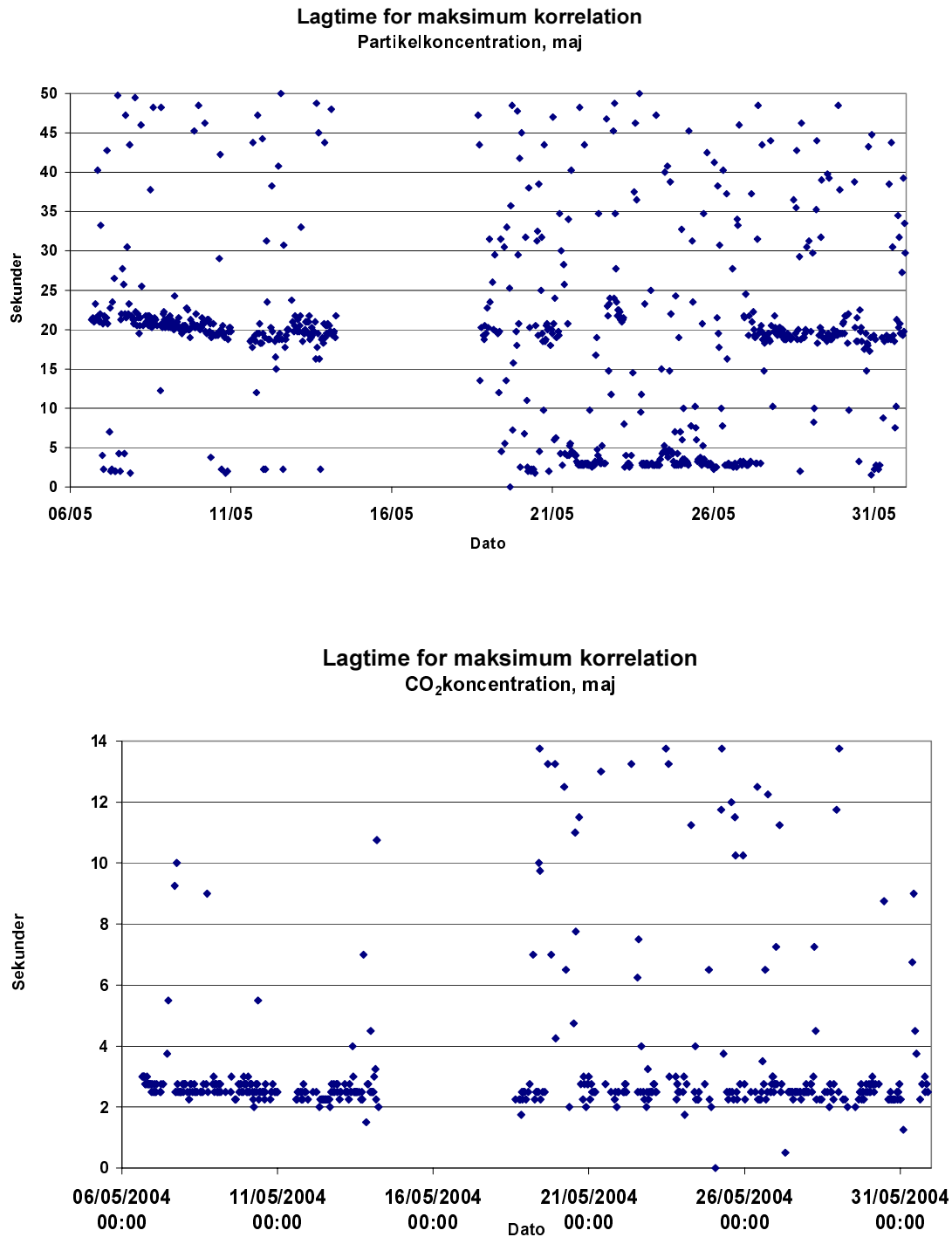
From Time =
To Time =
Signal (A) = W
Signal (B) = N
Storage Label A StdDev Stationarity =
Storage Label B StdDev Stationarity =
Storage Label AB Covariance Stationarity = stat_N
Segment length, minutes = 5
Linear detrend segments =
Linear detrend run =

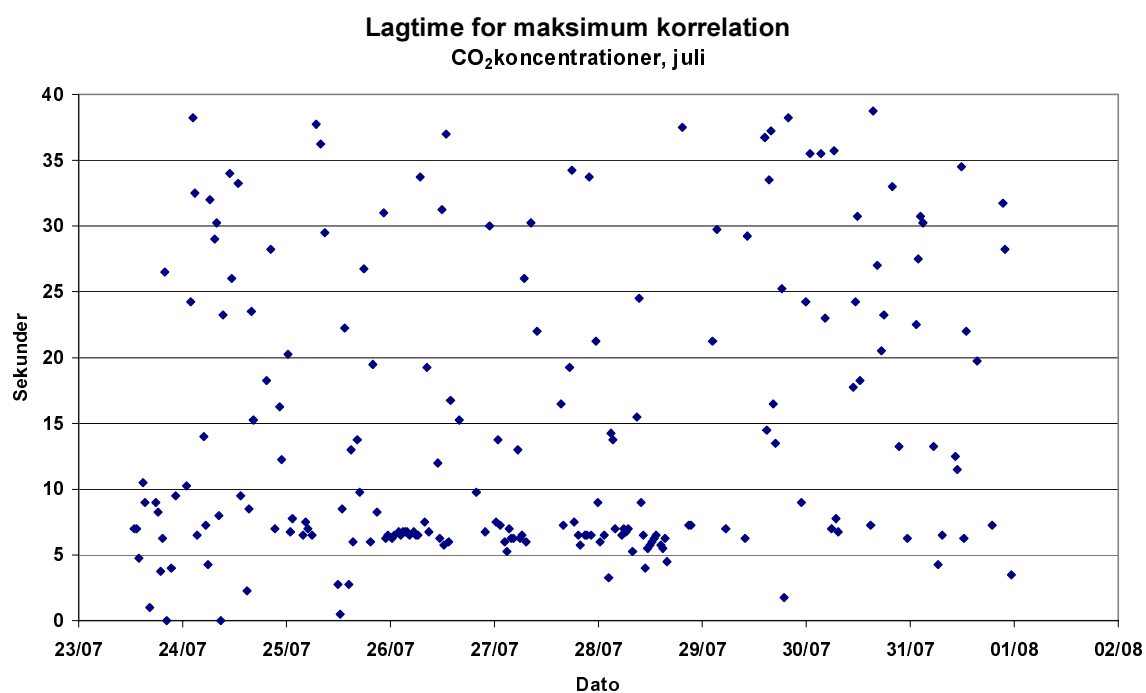
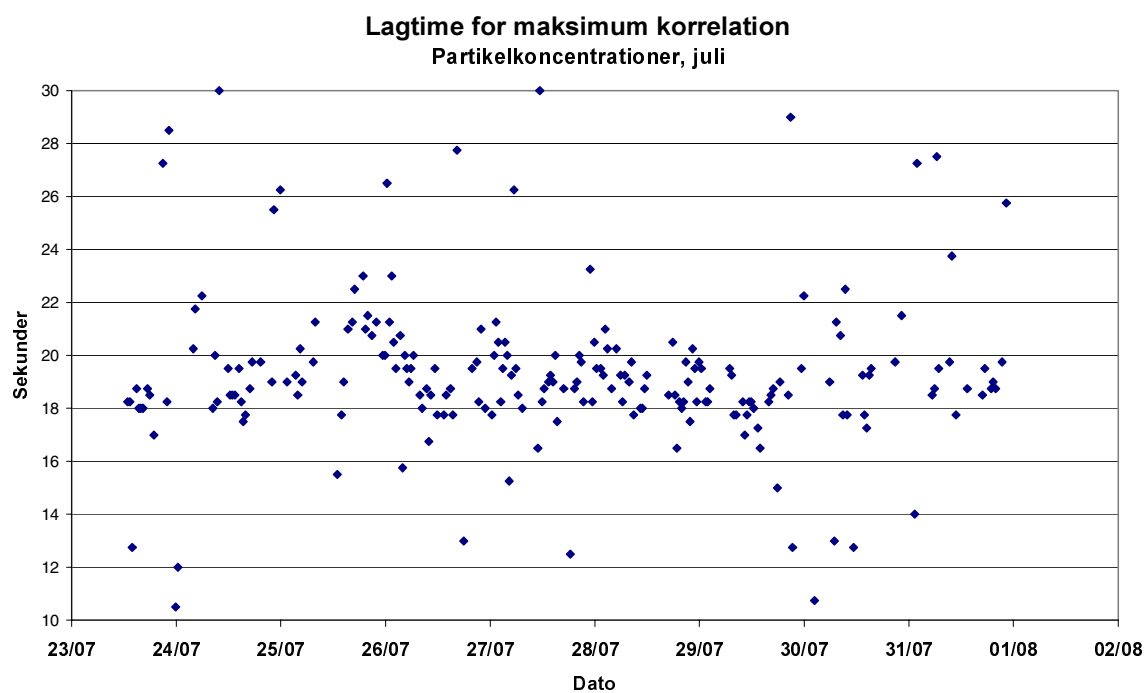
User defined

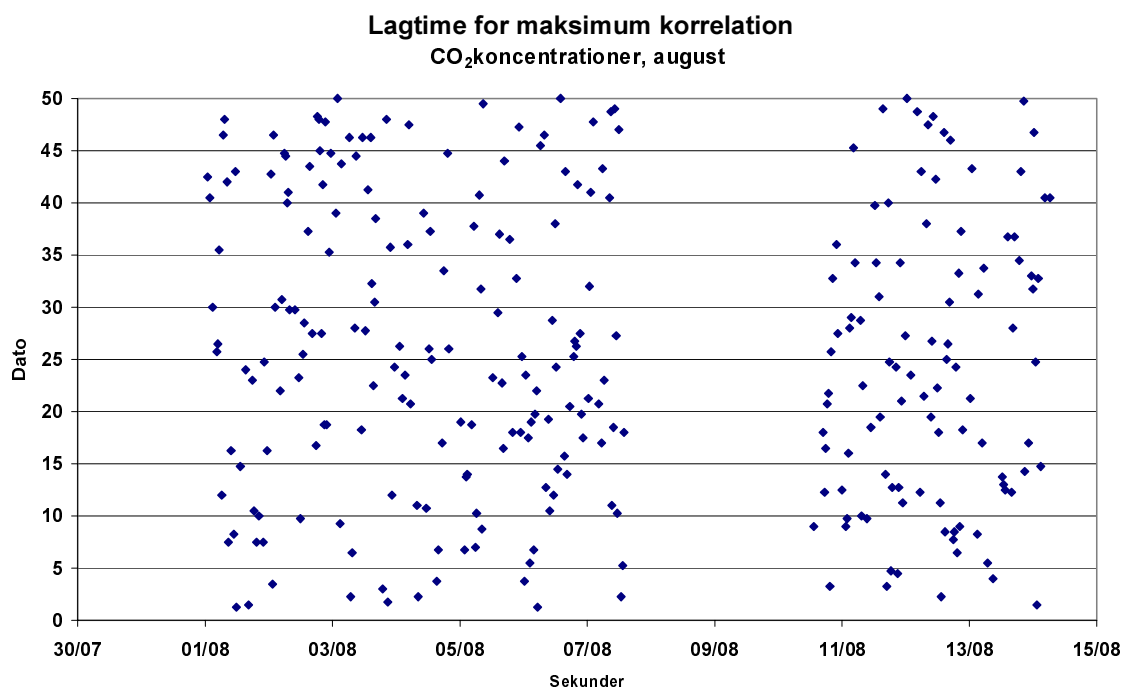
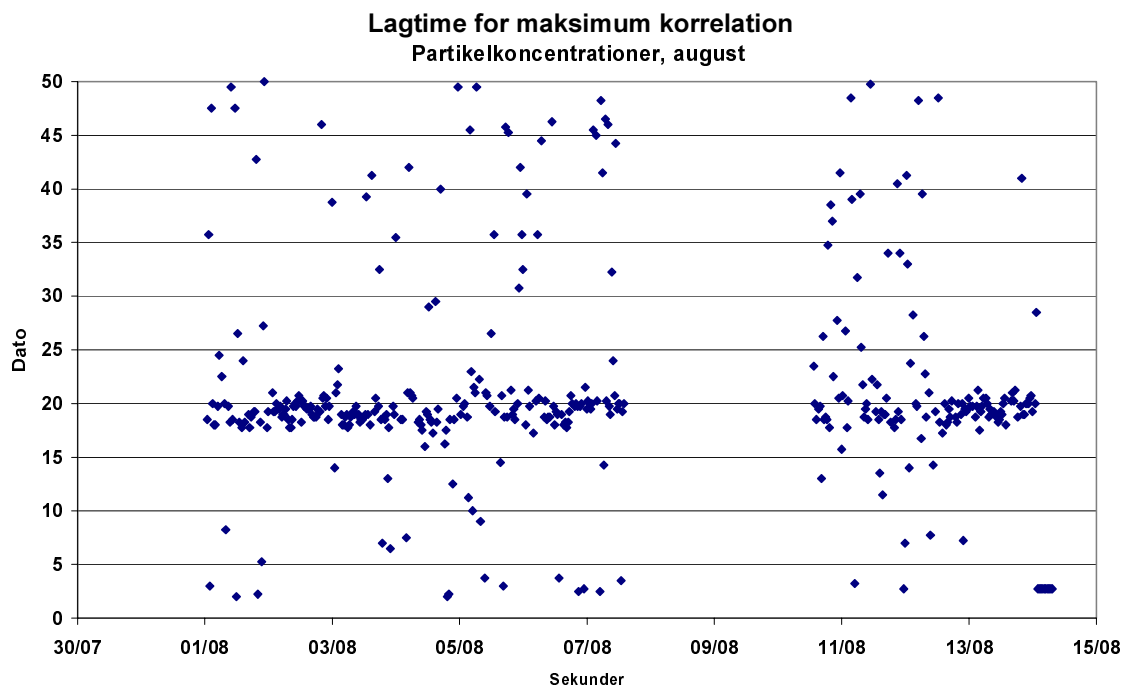
From Time =
To Time =
Storage Label = Vd
Apply to =
Apply by =
Equation = Flux_wN/Mean_N
Variable = Mean_N
Variable = Flux_wN

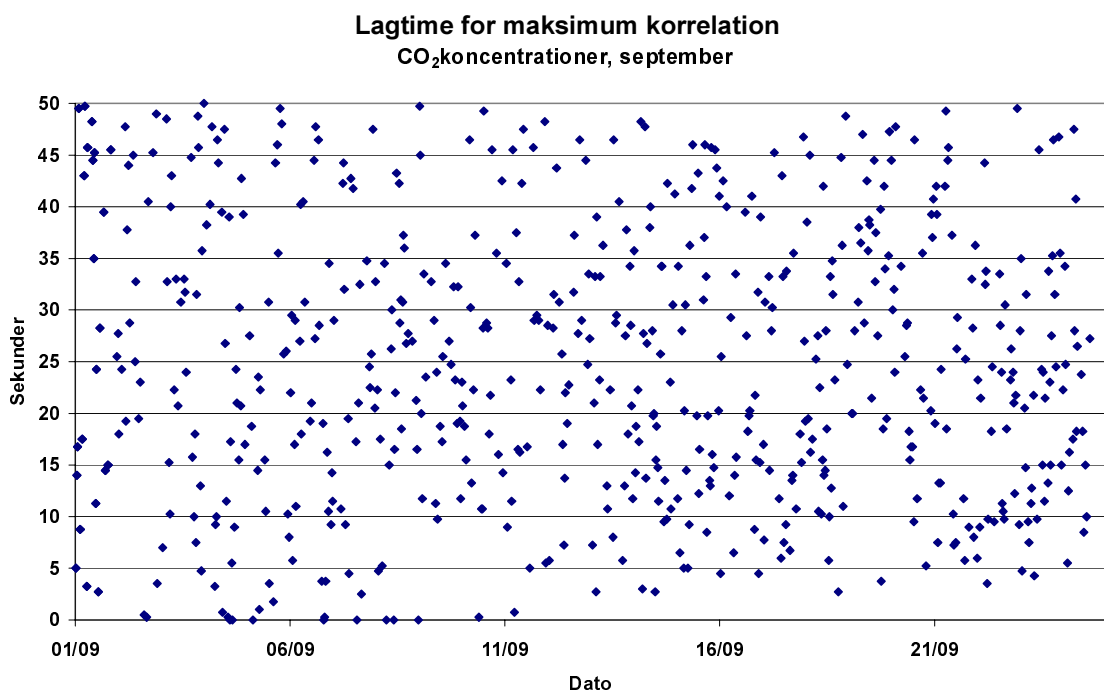
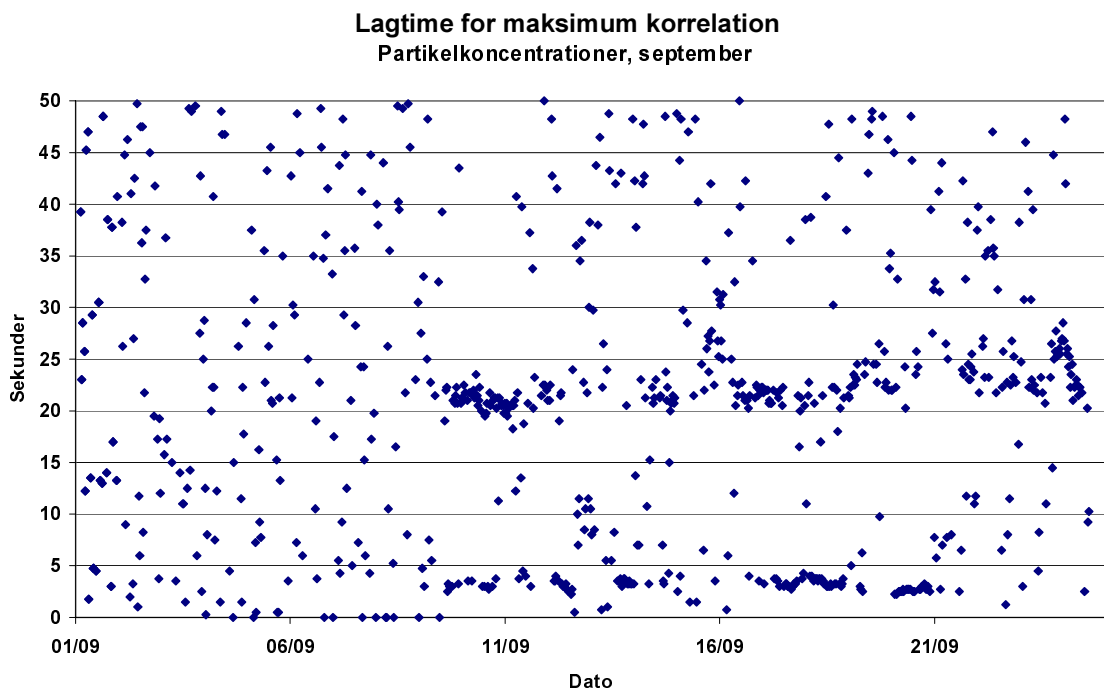
Appendiks 3

Lagtime for maksimum korrelation mellem partikelkoncentrationer og vertikal vind, og mellem CO₂ koncentrationer og vertikal vind. Grafer for juni er vist i figur 3.11, og aflæsninger for alle måneder er vist i tabel 3.1.

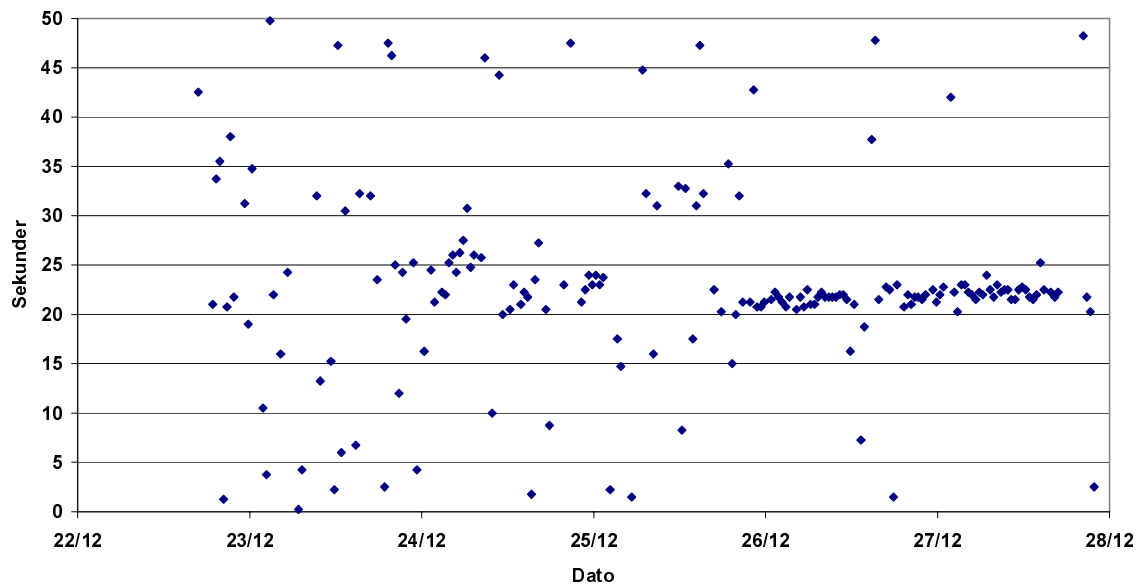




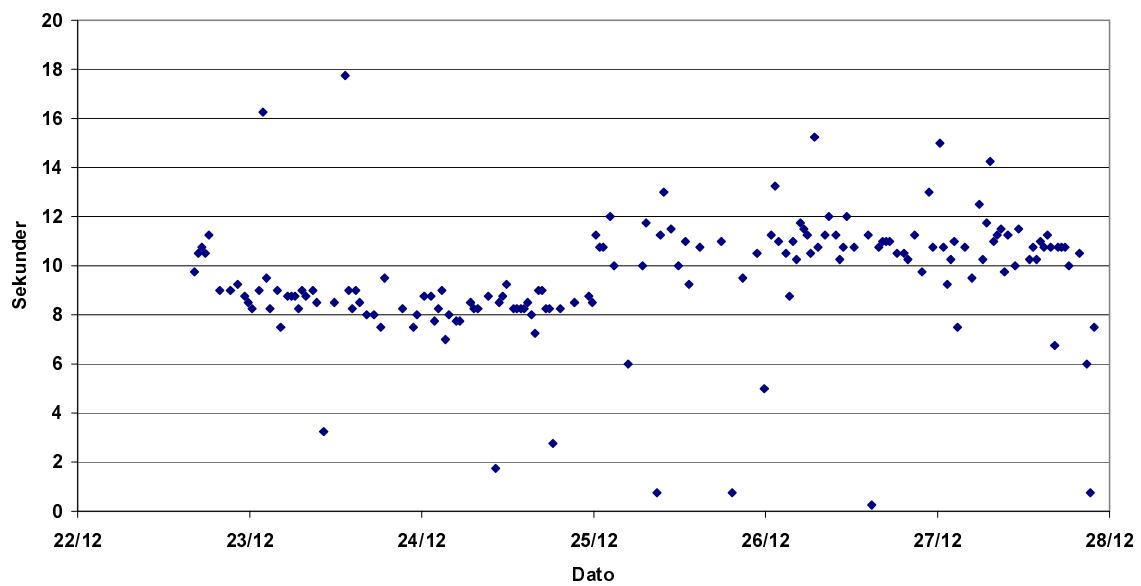




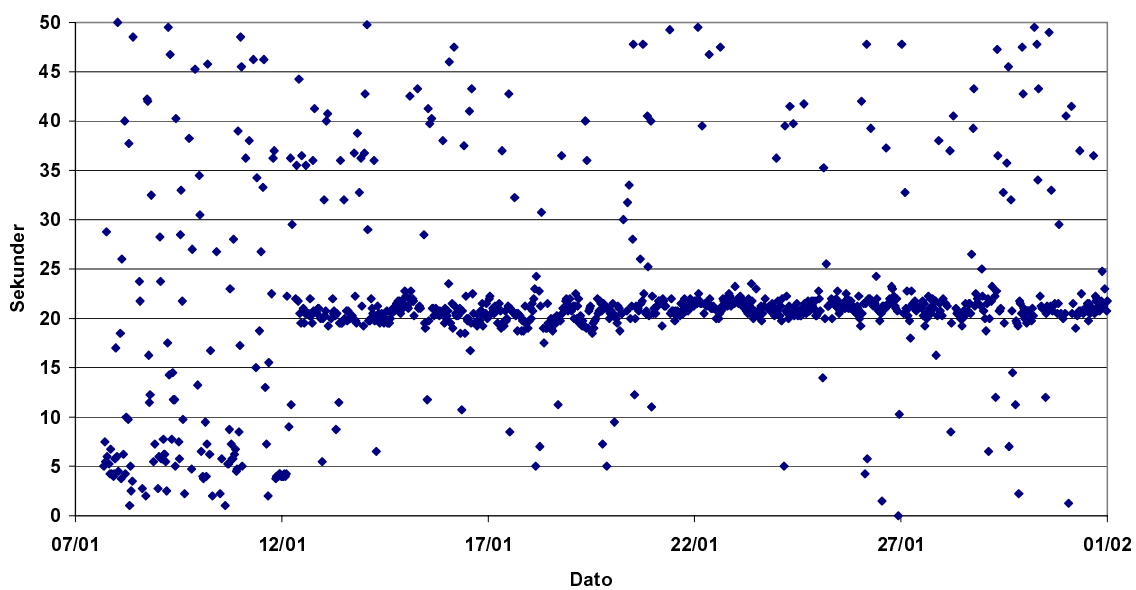
Lagtime for maksimum korrelation
Partikkelkoncentrationer, december



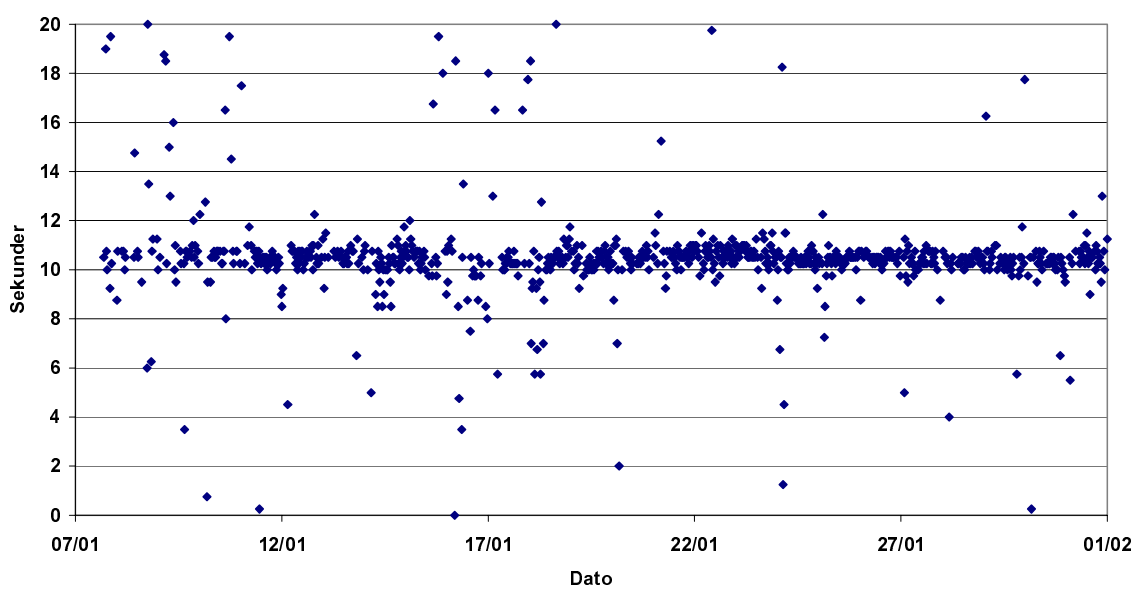
Lagtime for maksimum korrelation
CO₂koncentrationer, december



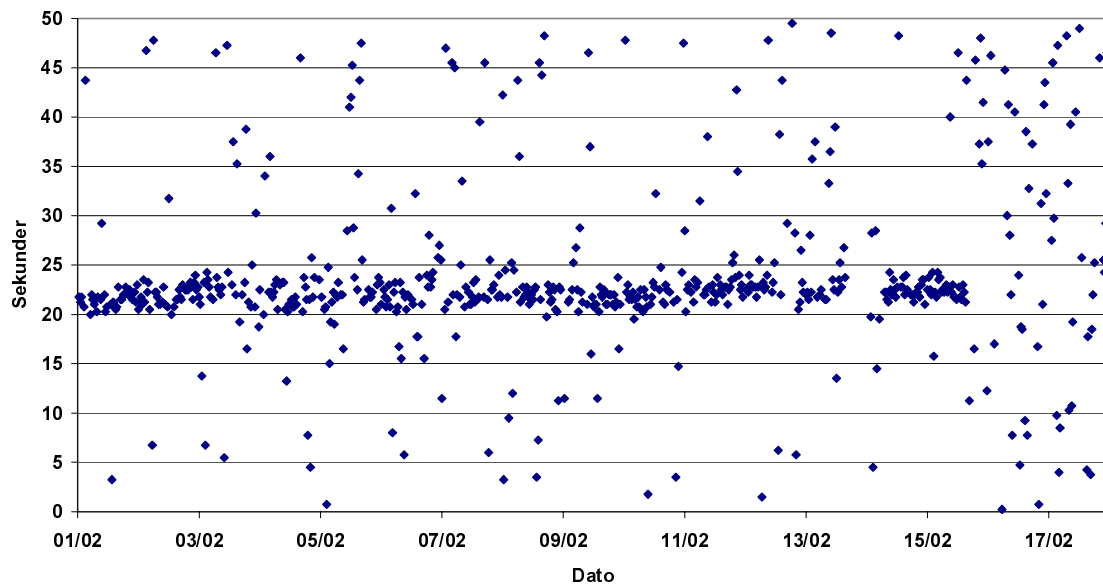
Lagtime for maksimum korrelation
Partikkelkoncentrationer, januar



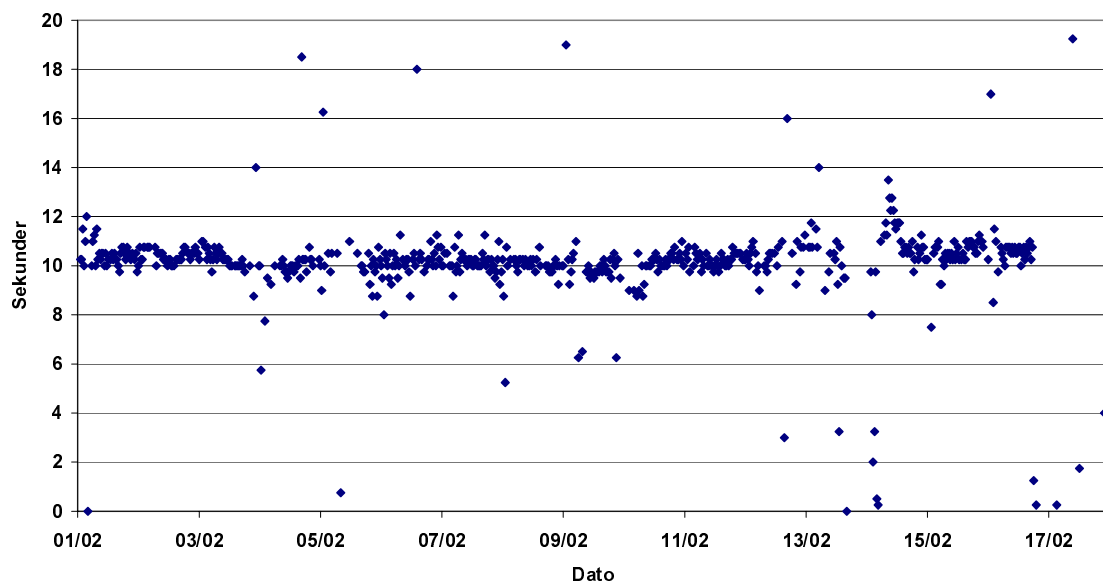
Lagtime for maksimum korrelation
CO₂koncentrationer, januar



Lagtime for maksimum korrelation
Partikkelkoncentrationer, februar



Lagtime for maksimum korrelation
CO₂koncentrationer, februar



Appendiks 4

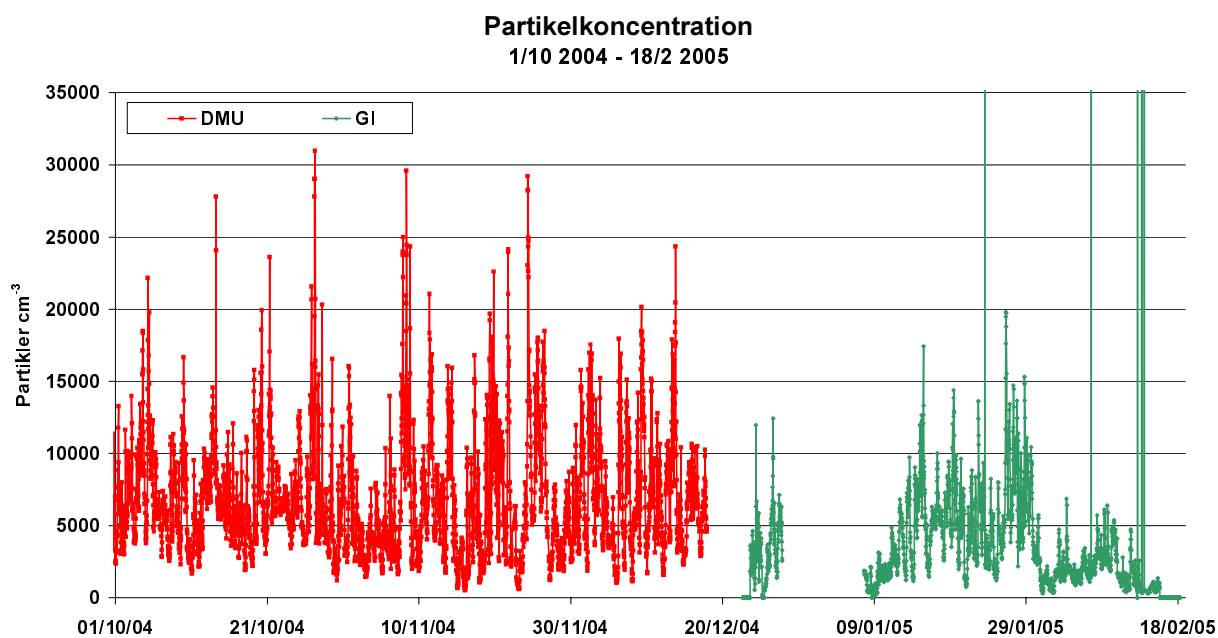
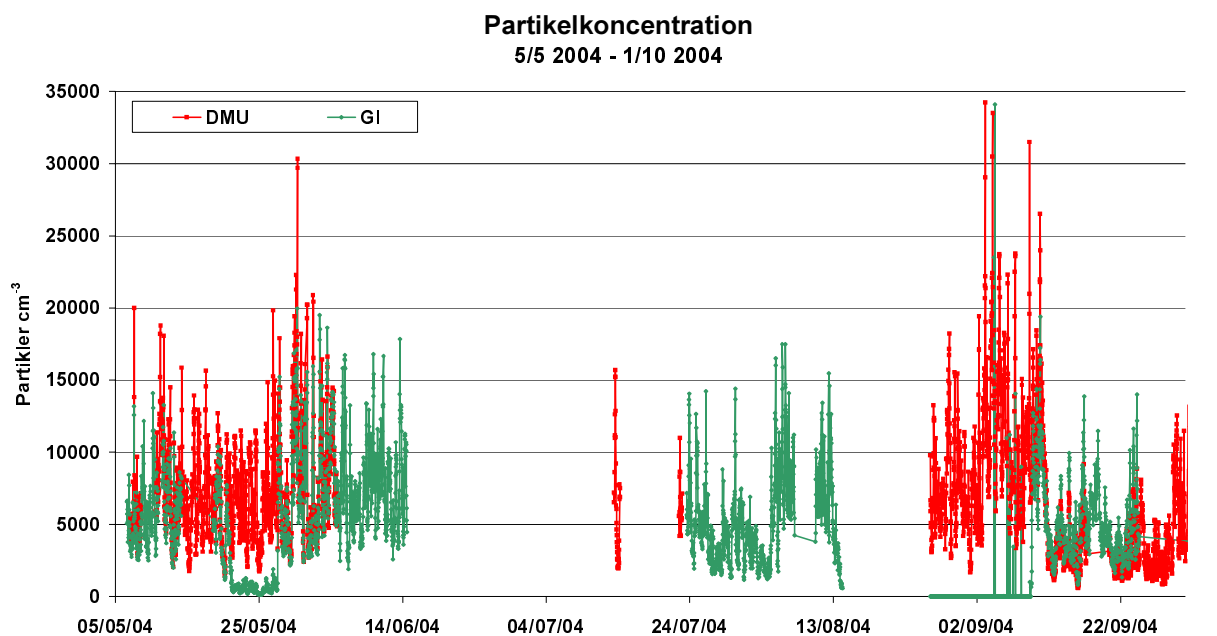
Diffusionskoefficienten D fra Hinds (1999)

APPENDIX A11 (a). Properties of Airborne Particles at Standard Conditions (SI Units) ^a						
Particle Diameter d (μm)	Slip Correction Factor C_c	Settling Velocity V_{TS} (m/s)	Relaxation Time τ (s)	Mobility B ($\text{m}^2/\text{N} \cdot \text{s}$)	Diffusion Coefficient D (m^2/s)	Coagulation Coefficient K (m^3/s)
0.001	224.332	6.75E-09	6.89E-10	1.32E+15	5.32E-06	3.11E-16
0.0015	149.752	1.01E-08	1.03E-09	5.85E+14	2.37E-06	3.81E-16
0.002	112.463	1.35E-08	1.38E-09	3.30E+14	1.33E-06	4.40E-16
0.003	75.174	2.04E-08	2.08E-09	1.47E+14	5.94E-07	5.39E-16
0.004	56.530	2.72E-08	2.78E-09	8.28E+13	3.35E-07	6.21E-16
0.005	45.344	3.41E-08	3.48E-09	5.32E+13	2.15E-07	6.93E-16
0.006	37.888	4.11E-08	4.19E-09	3.70E+13	1.50E-07	7.56E-16
0.008	28.568	5.51E-08	5.61E-09	2.09E+13	8.46E-08	8.63E-16
0.01	22.976	6.92E-08	7.05E-09	1.35E+13	5.45E-08	9.48E-16
0.015	15.524	1.05E-07	1.07E-08	6.07E+12	2.45E-08	1.09E-15
0.02	11.801	1.42E-07	1.45E-08	3.46E+12	1.40E-08	1.15E-15
0.03	8.083	2.19E-07	2.23E-08	1.58E+12	6.39E-09	1.14E-15
0.04	6.229	3.00E-07	3.06E-08	9.13E+11	3.69E-09	1.07E-15
0.05	5.120	3.85E-07	3.93E-08	6.00E+11	2.43E-09	9.92E-16
0.06	4.384	4.75E-07	4.84E-08	4.28E+11	1.73E-09	9.20E-16
0.08	3.470	6.69E-07	6.82E-08	2.54E+11	1.03E-09	8.03E-16
0.1	2.928	8.82E-07	8.99E-08	1.72E+11	6.94E-10	7.17E-16
0.15	2.220	1.50E-06	1.53E-07	8.68E+10	3.51E-10	5.83E-16
0.2	1.878	2.26E-06	2.31E-07	5.51E+10	2.23E-10	5.09E-16
0.3	1.554	4.21E-06	4.29E-07	3.04E+10	1.23E-10	4.34E-16
0.4	1.402	6.76E-06	6.89E-07	2.06E+10	8.31E-11	3.97E-16
0.5	1.316	9.91E-06	1.01E-06	1.54E+10	6.24E-11	3.76E-16
0.6	1.261	1.37E-05	1.39E-06	1.23E+10	4.98E-11	3.62E-16
0.8	1.194	2.30E-05	2.35E-06	8.75E+09	3.54E-11	3.45E-16
1.0	1.155	3.48E-05	3.54E-06	6.77E+09	2.74E-11	3.35E-16
1.5	1.103	7.47E-05	7.62E-06	4.31E+09	1.74E-11	3.22E-16
2.0	1.077	1.30E-04	1.32E-05	3.16E+09	1.28E-11	3.15E-16
3.0	1.051	2.85E-04	2.90E-05	2.05E+09	8.31E-12	3.09E-16
4.0	1.039	5.00E-04	5.10E-05	1.52E+09	6.15E-12	3.06E-16
5.0	1.031	7.76E-04	7.91E-05	1.21E+09	4.89E-12	3.04E-16
6.0	1.026	1.11E-03	1.13E-04	1.00E+09	4.05E-12	3.03E-16
8.0	1.019	1.96E-03	2.00E-04	7.47E+08	3.02E-12	3.01E-16
10	1.015	3.06E-03	3.12E-04	5.95E+08	2.41E-12	3.00E-16
15	1.010	6.84E-03	6.98E-04	3.95E+08	1.60E-12	2.99E-16
20	1.008	1.21E-02	1.24E-03	2.95E+08	1.19E-12	2.99E-16
30	1.005	2.72E-02	2.78E-03	1.96E+08	7.94E-13	2.98E-16
40	1.004	4.84E-02	4.93E-03	1.47E+08	5.95E-13	2.98E-16
50	1.003	7.55E-02	7.70E-03	1.18E+08	4.76E-13	2.98E-16
60	1.003	1.33E-01	1.11E-02	9.80E+07	3.96E-13	2.98E-16
80	1.002	1.72E-01	1.97E-02	7.34E+07	2.97E-13	2.98E-16
100	1.002	2.49E-01	3.07E-02	5.87E+07	2.37E-13	2.98E-16

^aCalculated for standard density spheres at 293 K [20°C] and 101 kPa (1 atm).

Appendiks 5

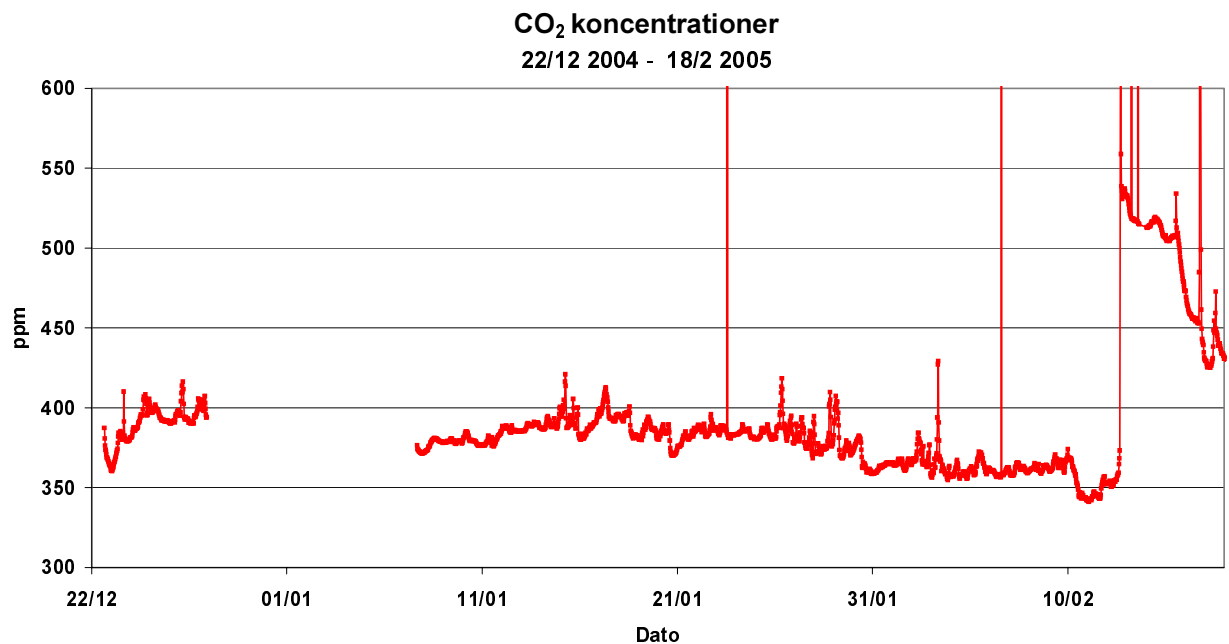
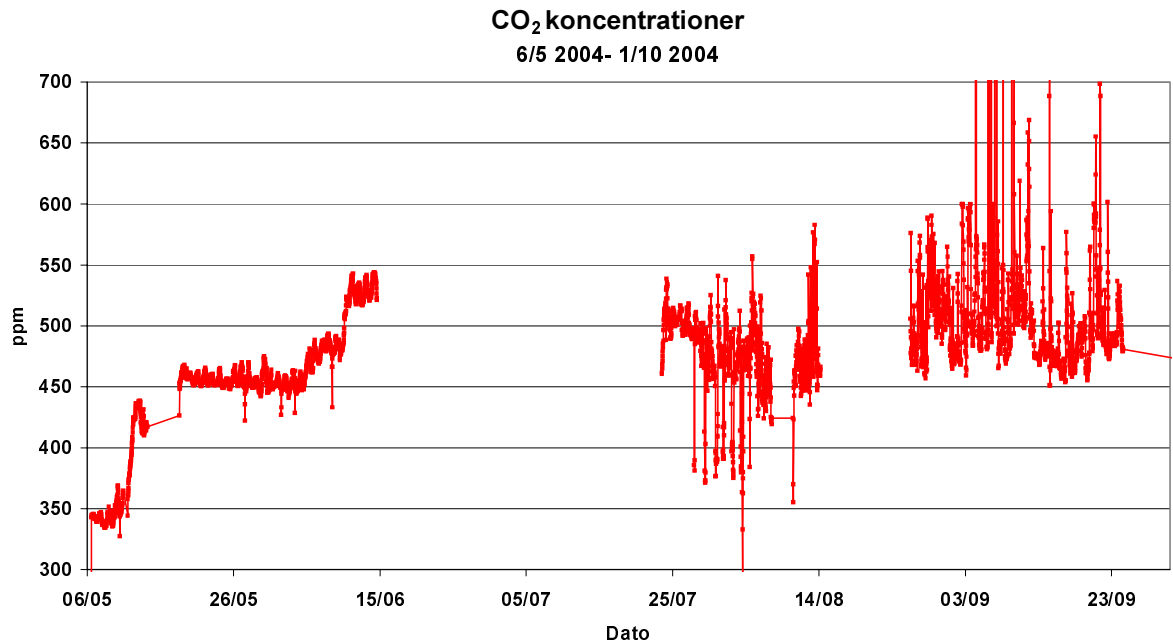
Partikkelkoncentrationer fra GI og DMU målinger fra måleperioden; 6/5 2004 til 18/2 2005.
Alle målinger.



Appendiks 6

CO₂ koncentrationer fra måleperioden; 6/5 2004 til 18/2 2005.

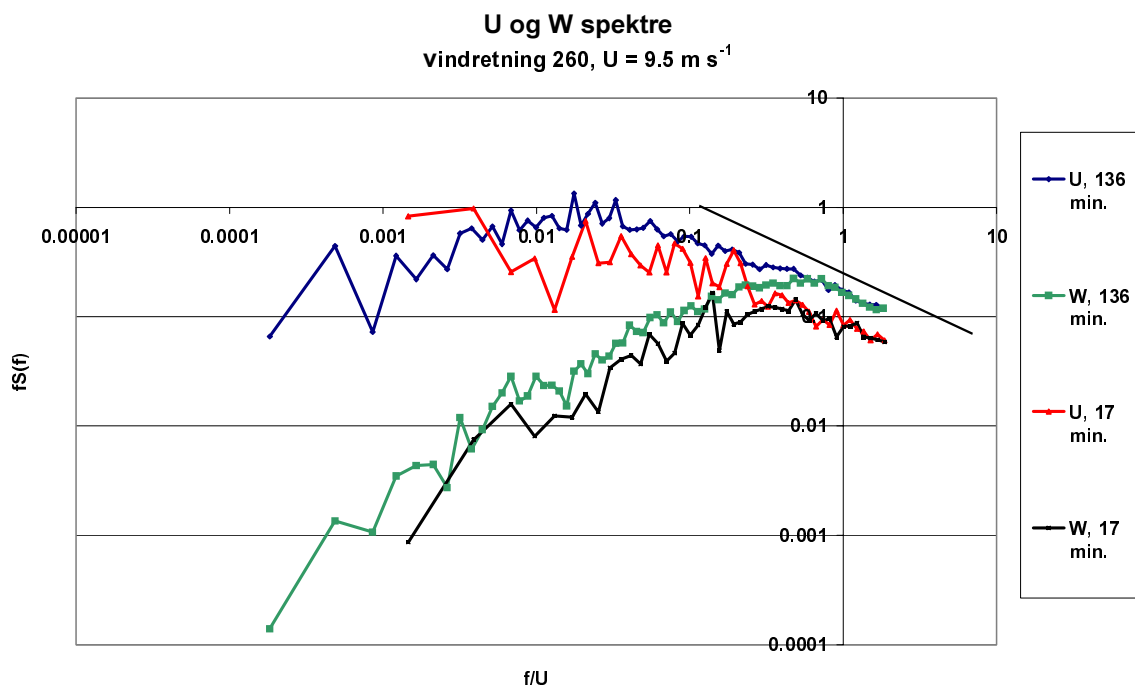
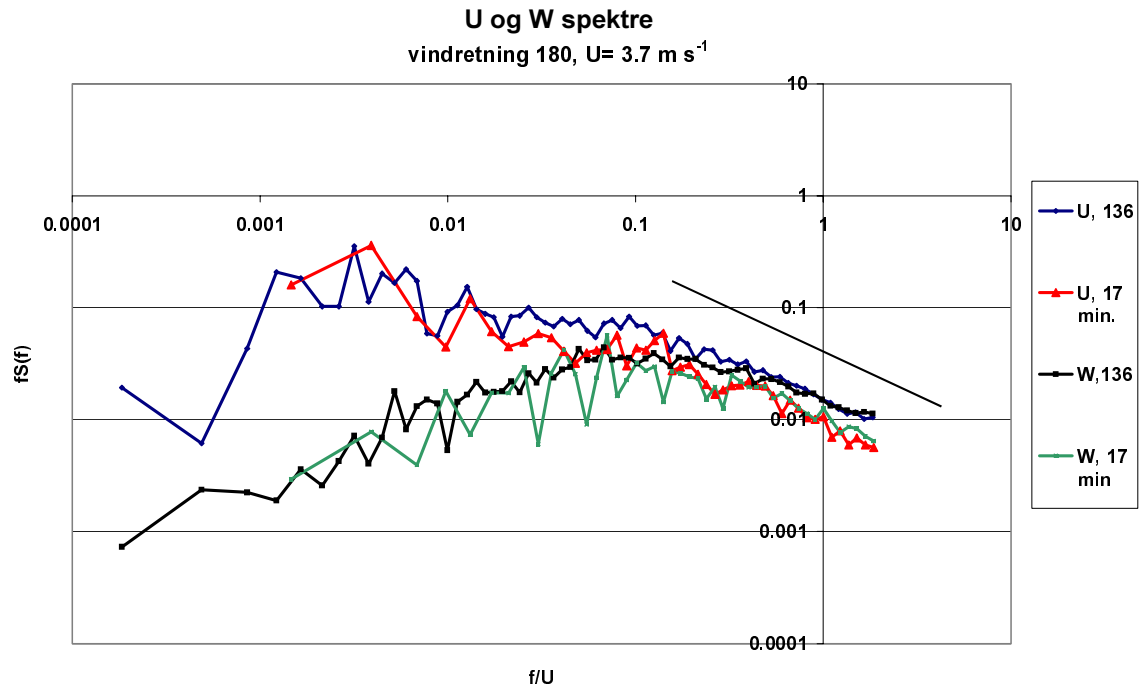
Alle målinger.



Appendiks 7

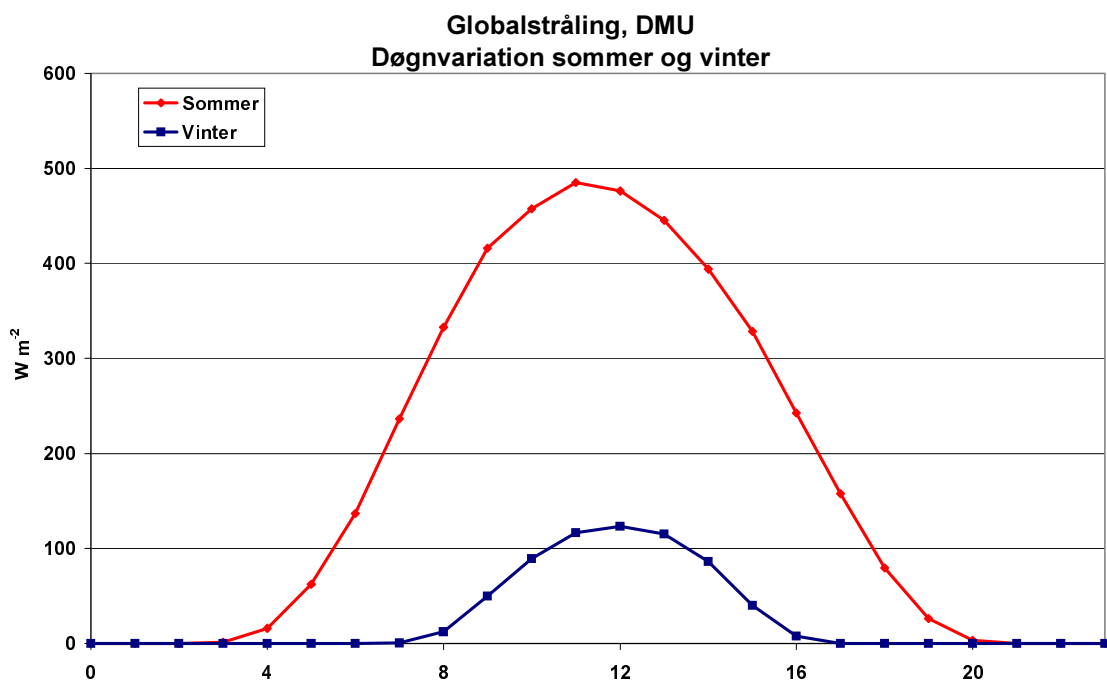
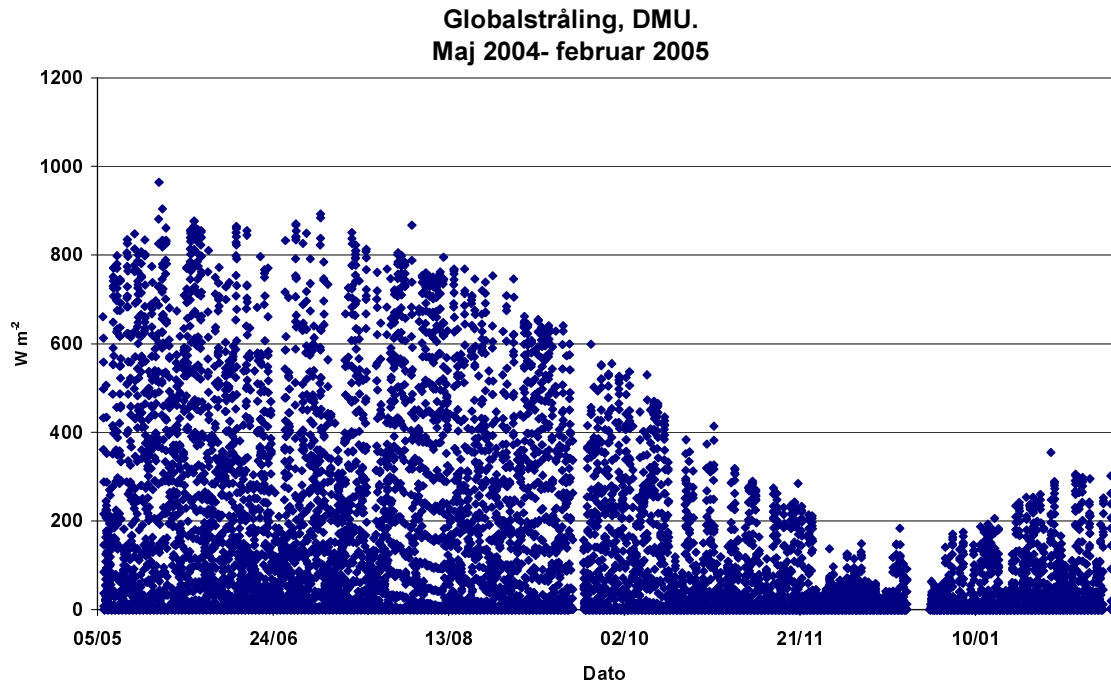
Eksempler på spektre beregnet på 17 minutters data sekvenser og 136 minutters datasekvenser.

Se tabel 4.1.



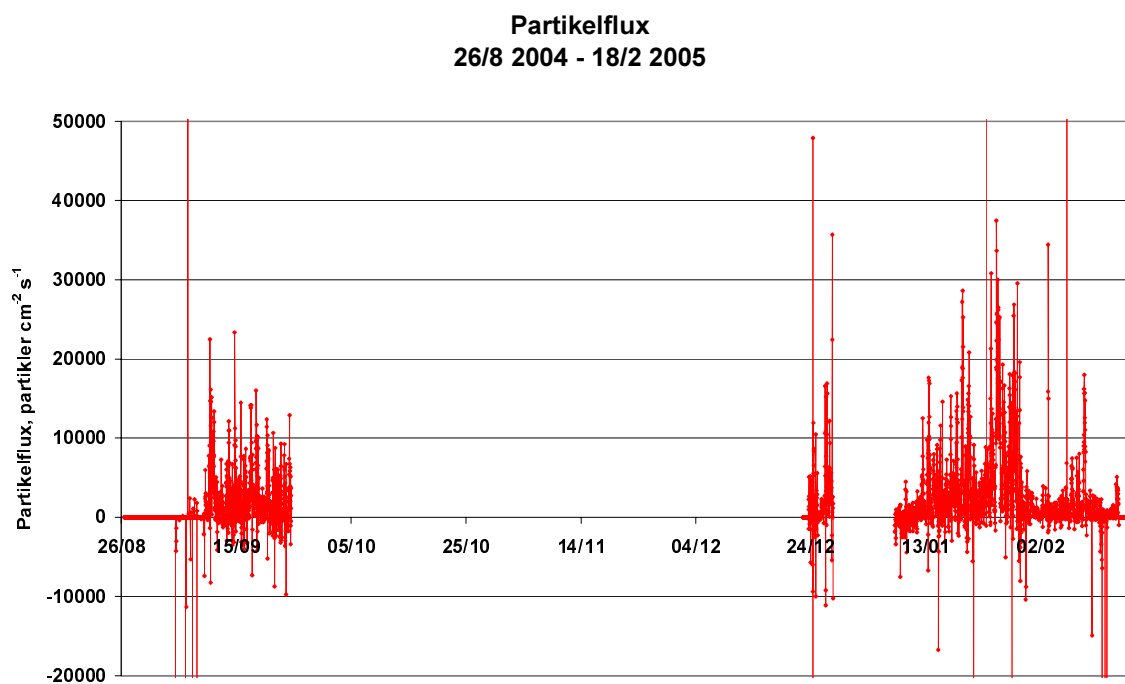
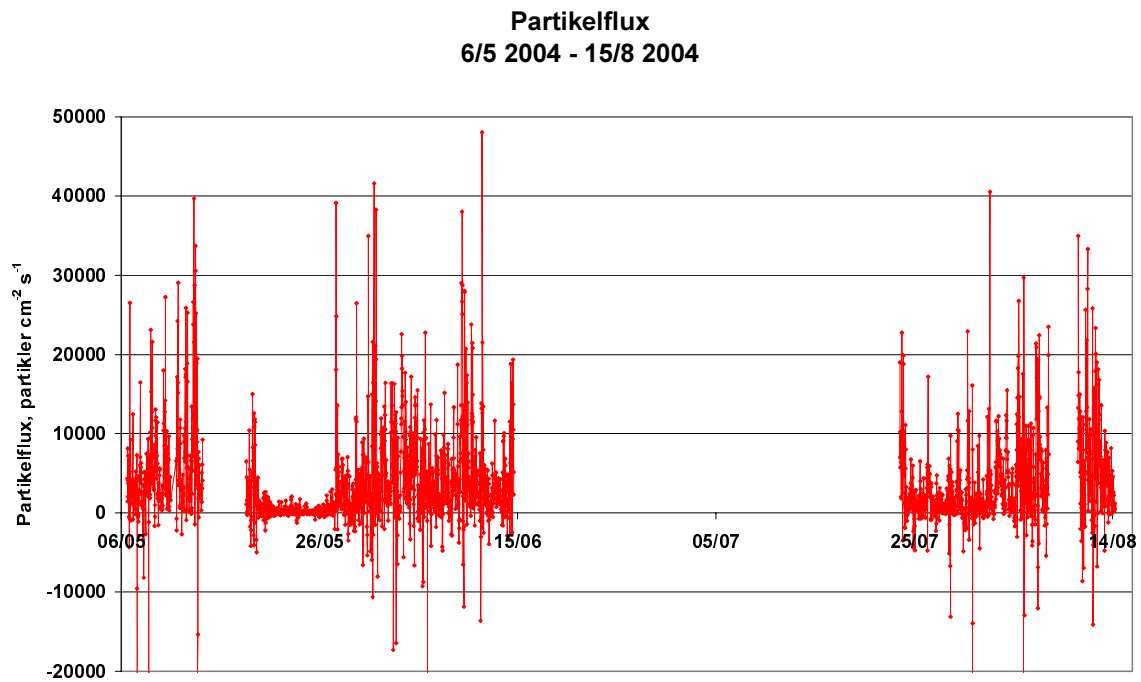
Appendiks 8

Globalstråling målt af DMU på taget af HCØ. Data fra 6/5-04 til 18/2-05.



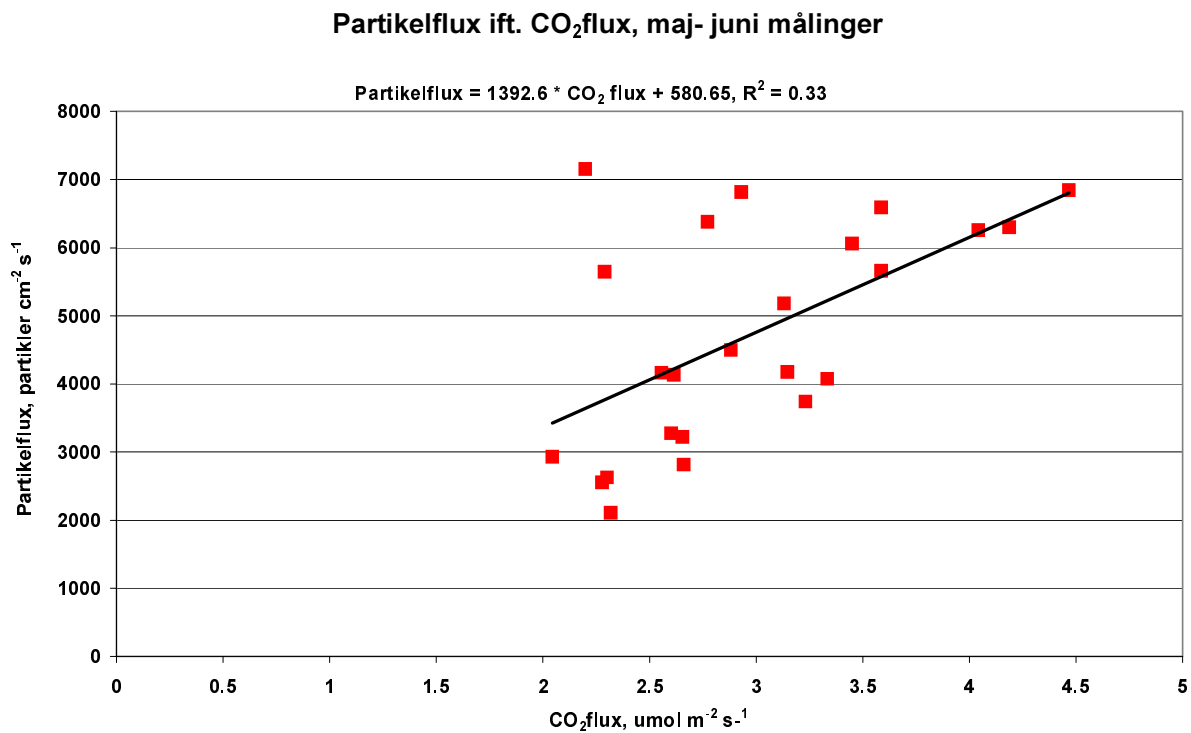
Appendiks 9

Plot af alle partikelfluxmålingerne uden frasoorteringer.



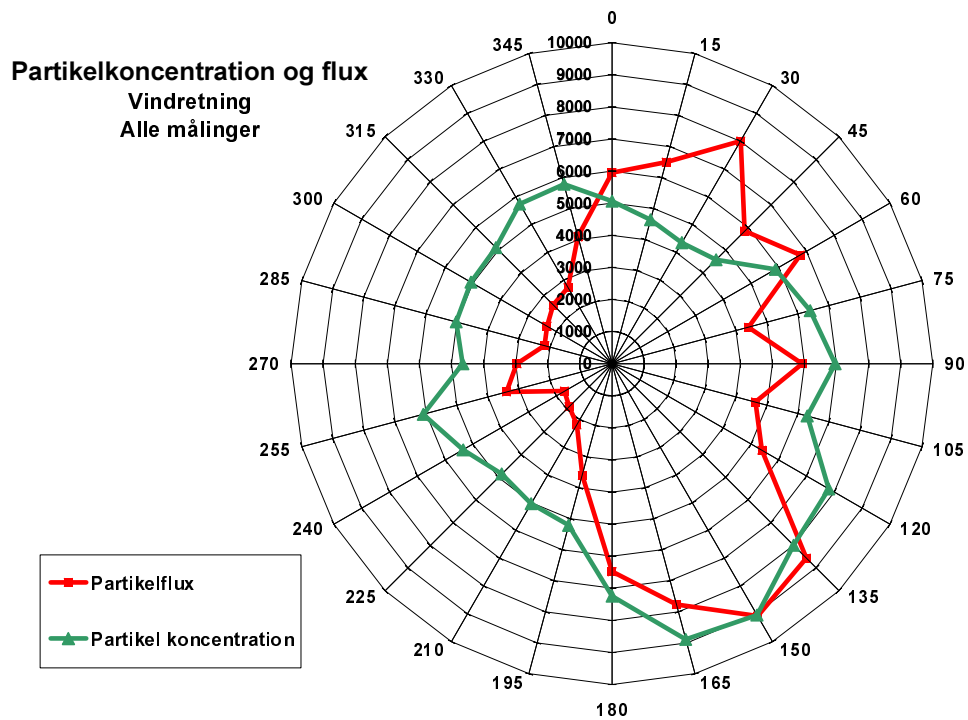
Appendiks 10

Plot af partikelflux i forhold til CO₂ flux, beregnet for målinger fra maj-juni.



Appendiks 11

Partikelkoncentrationer- og fluxe fordelt på vindretninger. Data fra alle vindretninger.



CO₂ koncentrationer og fluxe fordelt på vindretninger. Data fra januar.

