



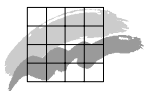
Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Luftforurening med partikler i København

Rapport udarbejdet for Københavns Kommune,
Miljøkontrollen

*Faglig rapport fra DMU, nr. 433
2003*

[Tom side]



Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet

Luftforurening med partikler i København

Rapport udarbejdet for Københavns Kommune,
Miljøkontrollen

*Faglig rapport fra DMU, nr. 433
2003*

*Finn Palmgren,
Peter Wählin,
Steffen Loft*

Datablad

Titel:	Luftforurening med partikler i København
Undertitel:	Rapport udarbejdet for Københavns Kommune, Miljøkontrollen
Forfattere:	Finn Palmgren, Peter Wählin og Steffen Loft
Afdeling:	ATMI, Københavns Universitet, institut for folkesundhedsvidenskab
Serietitel og nummer:	Faglig rapport fra DMU nr. 433
Udgiver:	Danmarks Miljøundersøgelser© Miljøministeriet
URL:	http://www.dmu.dk
Udgivelsestidspunkt:	2003
Redaktionen afsluttet:	15. februar
Faglig kommentering:	Marianne Glasius
Finansiell støtte:	Københavns Kommunes Miljøkontrol og DMU
Bedes citeret:	Palmgren, F., Wählin, P. & Loft, S. (2003). Luftforurening med partikler i København. En oversigt. Danmarks Miljøundersøgelser 77s.-Faglig rapport fra DMU nr.433. http://faglige-rapporter.dmu.dk
	Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse.
Sammenfatning:	Rapporten er en kort sammenfatning af de hidtil udførte undersøgelser af luftforureningen med partikler i København og et resumé af eksisterende viden. Tidligere undersøgte man total støv (TSP) og sod. Begge har vist en klart faldende tendens, dog med undtagelse af TSP på H.C. Andersens Boulevard, hvor koncentrationen har været nogenlunde konstant siden 1990. EU grænseværdier overskrides visse steder. Andre parametre er måske afgørende for partiklernes helbredsmæssige effekter. Især menes partikelstørrelsen at være afgørende, men også partiklernes fysiske og kemiske egenskaber har betydning. De ultrafine partikler menes at have de største helbredseffekter. En stor del af de ultrafine partikler findes i udstødningen fra bilerne, især dieselerne. Da trafikken er den vigtigste kilde til de danske partikelemissioner er der god grund til at søge at begrænse partikelforureningen. I rapporten gives anbefalinger til mulige tiltag, bl.a. partikelfiltre, miljøzoner og renere brændstof.
Emneord:	Luftforurening, partikler, ultrafine, trafik, København
Layout: Korrektur	Maria Pedersen Finn Palmgren
ISBN: ISSN (elektronisk):	87-7772-721-5 1600-0048
Sideantal:	77 si.
Internet-version:	Rapporten findes kunsom PDF-fil på DMU's hjemmeside http://www.dmu.dk/1_viden/2_Publikationer/3_fagrappporter/rapporter/fr433 , samt på http://www.miljoe.kk.dk
Købes hos	Miljøministeriet Frontlinien Strandgade 29 1401 København K Frontlinien@frontlinien.dk www.frontlinien.dk tlf. 32 66 02 00

Indhold

Ordliste	5
Forord	7
1 Introduktion	9
1.1 Generelt om partikler	9
1.2 Formål	9
1.3 Datagrundlag	10
2 Oversigt over partiklers egenskaber og måling af partikler	11
2.1 Partiklers egenskaber	11
2.2 Måling af partikler	12
2.3 Niveauer og udvikling af partikelforureningen (TSP og PM ₁₀) i Danmark	15
2.4 Trafikken som kilde til luftforurening med partikler	21
2.5 Emissionsmålinger på biler	22
2.6 Sammenfatning om partiklers egenskaber	23
3 Sundhedsmæssig vurdering af partikulær luftforurening	25
3.1 Generelt om helbredseffekter	25
3.2 Befolkningsundersøgelser	27
3.3 Sundhedsvurdering	30
4 Grænseværdier og emissionsbegrænsninger	35
4.1 EU-lovgivningen	35
4.2 EU-direktiver for luftkvalitet og danske bekendtgørelser	35
4.3 Krav til emissioner fra vejtrafik	37
5 Danske emissioner	39
5.1 Nationale emissionsopgørelser for partikler	39
6 Partikelemissioner i København	43
6.1 Trafikemissioner i København	43
6.2 Trafikkens bidrag til PM ₁₀ koncentrationer i bybaggrund	47
6.3 Trafikkens bidrag til partikelforureningen i gaderum	47
7 Analyse af luftkvalitetsdata fra København	49
7.1 Oversigt over de foreliggende data	49
7.2 Ultrafine partikler	54
7.3 Analyse af samvariationen	56
7.4 Analyse af PM ₁₀ data og sammenligning med grænseværdierne	59

7.5	Kildebidrag til PM ₁₀	60
7.6	Analyse af samtidige PM ₁₀ data og PM _{2.5} data	62
7.7	Inde-/udeforhold	64
8	Konklusioner	67
	Referencer	71
	English summary and conclusions	75
	Danmarks Miljøundersøgelser	78
	Faglige rapporter fra DMU	79

Ordliste

Alveoler:	Lungeblærer
Astma:	Åndedrætsbesvær pga. reversibel indsnævring af bronkier (se disse)
Bronkier:	Rørformede forbindelser og luftveje mellem luft-røret og lungeblærerne
Carcinogen:	Kærttfremkaldende
Cilier:	Fimrehår
DMA:	Differential Mobility Analyser, se kapitel 2.2
Granulocytter:	Hvide blodlegemer, der udskiller reaktive iltforbindelser/frie iltradikaler, når de stimuleres
Inflammation:	Betændelsesreaktion
Kardiovaskulære:	Som angår hjerte og blodkar
Kausal:	Forårsagende
Koagulation:	Blodstørkning
Kronisk bronkitis:	Tilbagevendende hoste, opspyt og evt. åndedrætsbesvær
LMP IV:	Det landsdækkende Luftkvalitetsmåleprogram
Lungecancer:	Lungekræft
Makrofager:	Hvide blodlegemer, der kan optage fremmedlegemer og mikroorganismer
Mediatorer:	Signalstoffer (kommunikation mellem cellerne)
Morbiditet:	Sygelighed
Mortalitet:	Dødelighed
µm:	Mikrometer (tusindedel millimeter)
nm:	Nanometer (milliontedel millimeter)
Oksidativt stress:	Ubalance mellem dannelse af reaktive iltforbindelser og forsvar mod dem bl.a. i form af antioksidanter
PM ₁₀ /PM _{2.5} :	Massen af partikler mindre en hhv 10 µm eller 2,5 µm (tusindedel millimeter)
SMPS:	Scanning Mobility Particle Sizer, se kapitel 2.2
SM200:	Partikelmonitor, se kapitel 2.2
TEOM:	Tapered Electronic Oscillating Microbalance, se kapitel 2.2
TSP:	Total Suspended Particulates (massen af partikler op til 20-30 µm, se kapitel 2.2)
TWC:	Trevejs katalysatorer, fjerner både CO, organiske stoffer og NO _x
VPF:	Value of a Prevented Fatality
WHO:	Verdenssundhedsorganisationen

Forord

Københavns Kommunes Miljøkontrol har anmodet DMU om udarbejdelse af en rapport om status for luftforureningen med partikler i København. Miljøkontrollen ønskede endvidere en vurdering af eksisterende viden på området, bl.a. om de kemisk/fysiske egenskaber af partikler, de væsentligste kilder samt sundhedsmæssige aspekter af denne type luftforurening.

Rapporten er blevet udarbejdet i løbet af sommeren 2002 i et samarbejde mellem DMU og Københavns Universitet. Sidstnævnte har især bidraget med vurdering af de sundhedsmæssige aspekter.

Data, som ligger til grund for rapporten, stammer fra Miljøkontrollens målinger, LMP IV og særlige målinger af partikler, som Miljøkontrollen har iværksat i samarbejde med DMU. Desuden ligger en række internationale kilder til grund for rapporten.

Rapportens indhold er følgende:

- Indledning med en oversigt over eksisterende viden og danske aktiviteter på området.
- Oversigt over den internationale viden om partiklers helbredseffekter.
- Kort gennemgang af EU regler.
- Emissioner af partikler er opgjort både på landsbasis og specielt i København.
- Analyse af de hidtil indsamlede data om partikler i København og en status på det foreliggende grundlag, herunder partikelniveauet på gade, bybaggrund og regional baggrund samt ude/indeforhold.
- Foreløbige konklusioner på det foreliggende datagrundlag, samt nogle forslag til mulige tiltag og undersøgelser.

1 Introduktion

1.1 Generelt om partikler

Sundhedsskadelige partikler

Luftforurening med partikler i byområder giver anledning til alvorlige sundhedsskadelige effekter, såvel langtidseffekter fx cancer og hjertekar sygdomme som akutte effekter fx allergi eller irritation af øjne, næse eller hals. Luftforurening med partikler karakteriseres oftest som TSP (Total Suspended Particulate Matter), PM_{10} eller $PM_{2.5}$ (Particulate Matter med partikelstørrelse mindre end 10 henholdsvis $2.5 \mu m$ i diameter). Mange undersøgelser tyder dog på at endnu mindre partikler, de såkaldte ultrafine partikler, er de mest skadelige. Der er endvidere en række andre egenskaber ved partiklerne, som menes at have betydning for deres skadevirkninger, fx. kemisk sammensætning, fysiske egenskaber, overfladeegenskaber, form, væskedråber eller faste partikler etc. Dette vil blive uddybet i kapitel 2 og de sundhedsmæssige aspekter af partikler vil blive behandlet i kapitel 3.

EU direktiver

I kapitel 4 omtales EU direktiver for luftkvalitet med hensyn til partikler. Det nye direktiv fra 1999 har givet grænseværdier for PM_{10} , som skal opfyldes i to faser før 2005 og før 2010. WHO har ikke givet anbefalinger om grænseværdier for partikler, fordi der mangler viden på området, og fordi man ikke har kunnet identificere en nedre tærskel for effekter. EU Kommissionen har derfor også konkluderet, at vores viden om sundhedsskadelige effekter samt kilderne og de fysiske/kemiske egenskaber er for ringe, og at man vil revidere grænseværdierne indenfor få år (2003-2004), når der foreligger mere viden. Direktiverne indeholder også forpligtelser for medlemslandene til at indsamle data om mindre partikler, $PM_{2.5}$.

Undersøgelser i Danmark

På denne baggrund er der iværksat en række undersøgelser både i Danmark og i udlandet. I Danmark har Miljøministeriet finansieret omfattende undersøgelser af partikelforureningen, som bl.a. udføres på Danmarks Miljøundersøgelser. Københavns kommune har endvidere iværksat målinger på H.C. Andersens Boulevard med henblik på vurdering af den københavnske trafiks bidrag til denne forurening, kapitel 7. De to undersøgelser er dog ikke afsluttet; derfor skal denne rapport ikke betragtes som en endelig rapportering af resultaterne.

1.2 Formål

Hovedformålet med denne rapport er at give en analyse af de målinger af partikler, som Miljøkontrollen i København har iværksat i samarbejde med Danmarks Miljøundersøgelser. Det er endvidere formålet at give en generel oversigt over partikkelproblematikken og at sætte målingerne i København i relation til den nuværende viden om partiklernes helbredsskader.

1.3 Datagrundlag

<i>Miljøkontrollens målinger</i>	Miljøkontrollen i København gennemfører omfattende luftkvalitetsmålinger, bl.a. på H.C Andersens Boulevard. De løbende målingerne omfatter de traditionelle luftforureninger: NO/NO ₂ , SO ₂ , CO, O ₃ , og partikler (TSP). Med henblik på at få en bedre viden om partiklerne og deres helbredsmæssige betydning har Miljøkontrollen i København i de senere år sammen med Danmarks Miljøundersøgelser iværksat avancerede målinger af partikler, herunder PM ₁₀ , PM _{2.5} og ultrafine partikler.
<i>Inde-/ude forhold</i>	Miljøkontrollen i København har endvidere deltaget i Danmarks Miljøundersøgelser's målinger af trafikens bidrag til forureningen indendørs i en lejlighed på Jagtvej i København under det såkaldte TRIP projekt.
<i>Danmarks Miljøundersøgelser's måleprogrammer</i>	Danmarks Miljøundersøgelser har i de senere år foretaget undersøgelser af partikler, deres forekomst, kilder, størrelsesfordelinger og kemisk sammensætning på flere lokaliteter i Danmark. Hovedvægten har dog været på målinger i København, både på gader (Jagtvej), bybaggrund og regional baggrund. Disse målinger er foretaget på målestationer under det Landsdækkende Luftkvalitetsmåleprogram (LMP IV). Data om traditionelle luftforureninger og meteorologi indgår i analysen.
<i>Måleperiode</i>	Overvågningsprogrammerne (LMP IV og de traditionelle målinger på H.C. Andersens Boulevard) har foregået i mere end 20 år, og danner derfor grundlag for vurderingerne. De specielle partikelmålinger er foregået i de seneste år, især i 2001 og 2002, og vil fortsætte de næste par år. Rapporten bygger derfor især på disse seneste målinger.

2 Oversigt over partiklers egenskaber og måling af partikler

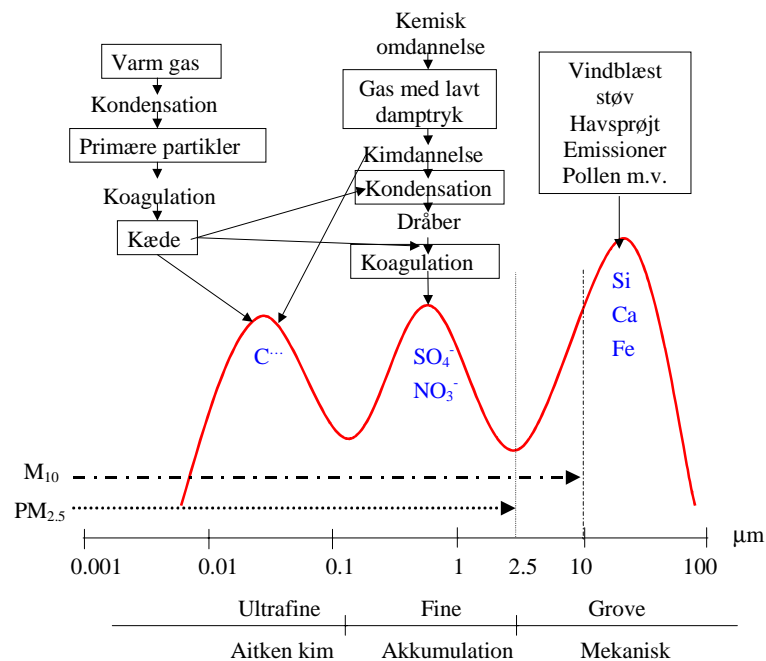
2.1 Partiklers egenskaber

Partikelstørrelser

Partikelstørrelsesfordelingen er en helt afgørende for partiklerne skadevirkninger. En væsentlig del af partiklerne i byluft stammer fra vejtrafikken, specielt fra dieselmotorer. Partikler emitteret fra bilmotorer, benzin- såvel som dieselmotorer, dannes ved høje temperaturer i motorerne, i udstødningsrørene eller umiddelbart efter emission til atmosfæren. Også andre forbrændingsprocesser og visse atmosfærekemiske processer giver anledning til dannelse af ultrafine partikler. Disse partikler tilhører den såkaldte kimdannelsesfraktion og er partikler med en diameter $< 0.2 \mu\text{m}$, ultrafine partikler. En meget stor andel af de partikler, der optræder i trafikerede gader, stammer fra trafikken. En anden fraktion af partikler er den såkaldte akkumuleringsfraktion (fine partikler), $0.2 \mu\text{m} - 2.5 \mu\text{m}$, som typisk dannes ved kemiske reaktioner (fx omdannelse af SO_2 og NO_x til sulfat og nitrat), koagulation, kondensation af gasser på partikler eller andre langsomme processer. En stor del af disse fine partikler er fjerntransportet materiale og således ikke af lokal oprindelse.

Den grove fraktion af partikler er $> 2.5 \mu\text{m}$ dannes typisk mekanisk, ved trafikskabt turbulens, vinderosion, havsprøjt etc. Det er typisk vindblæst støv, ophvirvlet vejestøv samt slitageprodukter fra dæk og bremses. De grove partikler indeholder derfor en hel del jordstoffer, silicium, calcium og jern (Si, Ca og Fe). Disse store partikler kan også give anledning til sundhedsskadelige effekter. Denne opdeling er ikke særlig skarp og i litteraturen anvendes også andre definitioner af de enkelt partikelfraktioner.

Størrelsesfordelinger og de væsentligste karakteristika af partikler i byluft er vist skematisk i *Figur 1*. Ovennævnte tre typer af partikler og deres dannelsesmåde genkendes i figuren. Her er også angivet at



Figur 1 Skematisk tegning af størrelsesfordelingen af partikler i byluft. Den vandrette akse er partikeldiameteren i μm . Den lodrette akse har en arbitrær skala.

PM_{10} og $\text{PM}_{2.5}$. Formen på fordelingen afhænger af den lodrette akse; hvis denne akse er massen vil den ultrafine del af fordelingen være forsvindende lille, og hvis denne akse er antal af partikler, vil den grove del af fordelingen være ubetydelig. Det illustreres fx ved at 1 partikel på $10 \mu\text{m}$ vejer det samme som 1000 partikler på $1 \mu\text{m}$.

2.2 Måling af partikler

TSP og sod

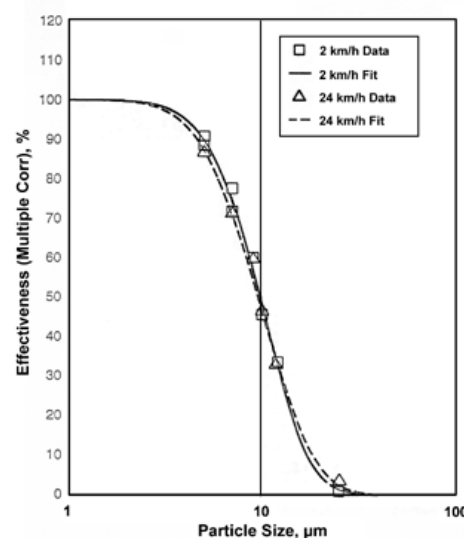
Måleteknisk opererer man, i luftkvalitets-sammenhæng, med forskellige partikeldefinitioner. Indtil for få år siden har målinger alene omfattet bestemmelse af luftens indhold af svævestøv (TSP, "total suspended particulates") og sod. TSP omfatter typisk alle partikler med en diameter på op til omkring $30 \mu\text{m}$., men afskæringsdiameteren varierer fra ca. 10 til $50 \mu\text{m}$ afhængig af bl.a. vindhastigheden. Mængden bestemmes ved vejning efter opsamling på filter. Sod omfatter farvede (sorte) partikler, som primært dannes ved forbrænding af olieprodukter. Sod bestemmes empirisk ud fra sværtningsgraden af et hvidt filter.

PM_{10} og $\text{PM}_{2.5}$

I de senere år er opmærksomheden i større grad blevet rettet mod de mindre partikler og måling af PM_{10} indholdet i luften (partikler med en diameter under $10 \mu\text{m}$) er blevet mere almindelig, *Figur 2*. Der er to vigtige argumenter for at måle PM_{10} frem for TSP. Ved målingen af PM_{10} undgår man problemet med den varierende afskæringsdiameter ved at afskære de største partikler ($>10 \mu\text{m}$) på en veldefineret måde inden opsamlingen. Den anden fordel er, at disse store partikler ikke anses for sundhedsskadelige, således at PM_{10} bliver et mere relevant mål ved fastsættelsen af grænseværdier. Herudover måles i et vist

omfang også $PM_{2,5}$ (partikler med en diameter under $2,5 \mu m$), da disse partikler anses for at have endnu større sundhedsmæssig betydning.

Som det fremgår af ovenstående *Figur 1*, er PM_{10} måske ikke den mest hensigtsmæssige måde at beskrive forekomsten af de mindste partikler. Skillelinien går et sted i den fraktion, der benævnes grove partikler. $PM_{2,5}$ er måske et bedre mål, idet det netop omfatter summen af fine og ultrafine partikler. Da de mindste partikler kun giver et ubetydeligt bidrag til vægten af den samlede partikelmasse, vil fremtidige mere præcise sundhedsmæssige vurderinger forudsætte, at der foreligger informationer om de mindste partikelfraktioner (antallet af især de mindste partikler og deres egenskaber).



Figur 2 PM_{10} bestemmes ved opsamling af svævestøv på filter. Et indsugningshoved (vist til venstre i figuren) frasorterer partikler med diameter $> 10 \mu m$. Grafen i højre side af figuren viser, at afskæringen ikke er skarp, men defineret af et standard indsugningshoved.

Massebestemmelse

Massen (TSP, PM_{10} og $PM_{2,5}$) kan bestemmes på flere måder. EU-referencemetoden er baseret på vægtforøgelsen af et filter efter opsamling af partikler ved gennemsugning af forurenede luft (gravimetrisk bestemmelse). Dette kræver manuelt laboratoriearbejde.

Da man imidlertid har brug for aktuelle data, bl.a. med henblik på information til befolkningen, er der udviklet automatiske metoder. En af metoderne (SM200), bruges i LMP IV til måling af døgnmiddelværdier, er baseret på forøgelse af absorption af beta-stråling i et filter efter opsamling af partikler på filteret. SM200-monitoren har opnået akkreditering hos DANAK, idet der ved målinger i Berlin er påvist en tilfredsstillende overensstemmelse med referencemetoden. En anden metode er den såkaldte TEOM (Tapered Electronic Oscillating Microbalance), som er baseret på fald i svingningsfrekvensen på en vibrerende enhed, hvorpå der er monteret et filter til opsamling af partikler. Metoden har sin styrke i stor tidsopløsning ($1/2$ -1 time), og er derfor velegnet til måling i nærheden af trafikken, hvor forureningen varierer i takt med trafikken. Metoden anvendes til PM_{10} og $PM_{2,5}$ på H.C. Andersens Boulevard sammen med en gravimetrisk TSP bestemmelse. En ulempe er, at man er nødt til at opvarme filteret for at

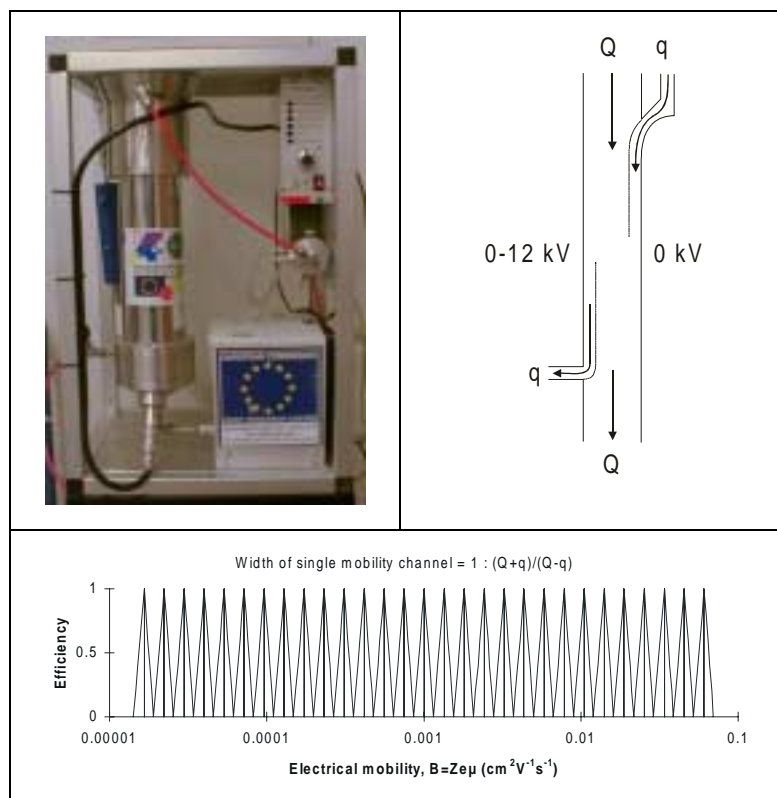
fjerne en vis mængde vand, hvilket dog også fører til tab af flygtige stoffer, fx. ammoniumnitrat og organiske forbindelser. Dette vil kræve en korrektion, se afsnit 7.4.

Andre parametre

De nye EU luftkvalitets-grænseværdier er fastsat for PM_{10} . De er i det væsentlige baseret på undersøgelser i USA i begyndelsen og midten af 1990'erne, samt nyere undersøgelser i Europa. En revision af EU grænseværdierne er planlagt til 2003-2004, fordi man har erkendt, at det nuværende grundlag er for svagt, og fordi man overvejer at anvende andre mål for forureningen med partikler, fx. $PM_{2.5}$, PM_{1} , $PM_{0.??}$, partikelantal eller andre mål for partikelforureningen.

Ultrafine partikler

Til måling af de fine og ultrafine partikler kan anvendes "Differential Mobility Analyser" (DMA), som kan bestemme antal partikler i størrelsesfraktioner i intervallet 0.01-0.7 μm (Figur 3).



Figur 3 Øverst til venstre ses en SMPS. Til højre er vist princippet i en DMA og nederst er vist, hvorledes partiklerne sorteres efter deres mobilitet.

I en DMA sorteres partikler efter størrelse ved at tilpasse den elektriske spænding mellem den indre elektrode og DMA-huset således at en bestemt størrelse af partikler netop rammer udgangsspalten og fortsætter til en kondensationskimtæller (q udgangen). Sættes en varierende spænding på elektroden kan man scanne henover et partikelstørrelsesinterval, så man får en såkaldt SMPS (Scanning Mobility Particle Sizer). I DMU's system foregår det mellem 6 og 700 nm i løbet af 2-3 minutter.

2.3 Niveauer og udvikling af partikelforureningen (TSP og PM₁₀) i Danmark

TSP målinger i LMP

TSP bliver målt i det Landsdækkende Luftkvalitetsmåleprogram (LMP) (www.dmu.luft.dk og Kemp and Palmgren, 2002). TSP i byluft er en blanding fra forskellige kilder, men de grove (> 2.5 µm) fra vindophvirvlet støv af lokal oprindelse dominerer massen af denne del af partikelstørrelsesfordelingen. TSP er målt som 24 timers gennemsnitsværdier flere steder i landet, bl.a. i København.

Statistiske data for PM₁₀ fra 2001 er vist i *Tabel 1*. De gamle grænseværdier blev ikke overskredet. PM₁₀ målinger blev først påbegyndt i 2001, og derfor er datasættene ikke komplette.

PM₁₀ *Tabel 1* Gennemsnitsværdier, 95-percentiler og maksimum værdier for PM₁₀ (µg/m³) i 2001. Dataene er baseret på 24 timers gennemsnit.

Station	Antal	Gns.	36. højeste ¹	90-perc.	95-perc.	8. højeste ²	Max.	Dato
<i>Trafik:</i>								
København/Jagtvej	262	34	48	54	62	67	216	1. jan.
Århus	140	32	-	-	-	-	-	-
Odense	260	31	45	50	58	64	84	8. mar.
Aalborg	292	29	45	48	56	60	84	15. okt.
<i>Bybaggrund:</i>								
Aalborg	170	24	-	-	-	-	-	-
<i>Land:</i>								
Ll. Valby/2090	316	21	34	35	44	50	74	15. aug.
Keldsnor/9055	76	-	-	-	-	-	-	-
Grænseværdi	>329	40/20 ³	50	-	-	(50)	-	-

EU direktivernes nye grænseværdier er ikke overskredet. Det skal dog bemærkes, at antallet af målinger er under det krævede på 329 døgn. PM₁₀ målinger på H.C. Andersens Boulevard blev først iværksat medio 2001 og med en anden metode, som kræver en korrektion (se afsnit 7.4). Derfor er disse data ikke medtaget i tabellen. Grænseværdien for 2010 er klart overskredet, og det er tvivlsomt om vi vil kunne overholde den, bl.a. fordi en del af PM₁₀ forureningen er af naturlig oprindelse eller ophvirvlet støv fra forskellige aktiviteter, bl.a. byggerier og jordbrug.

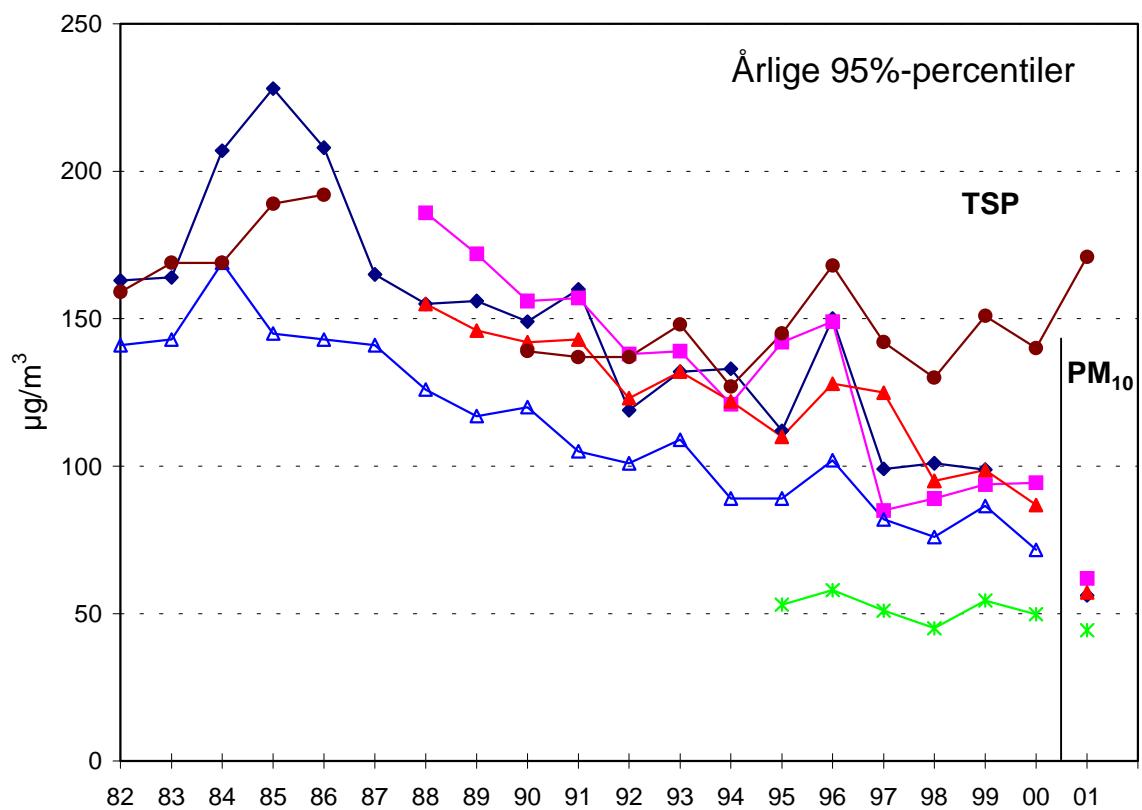
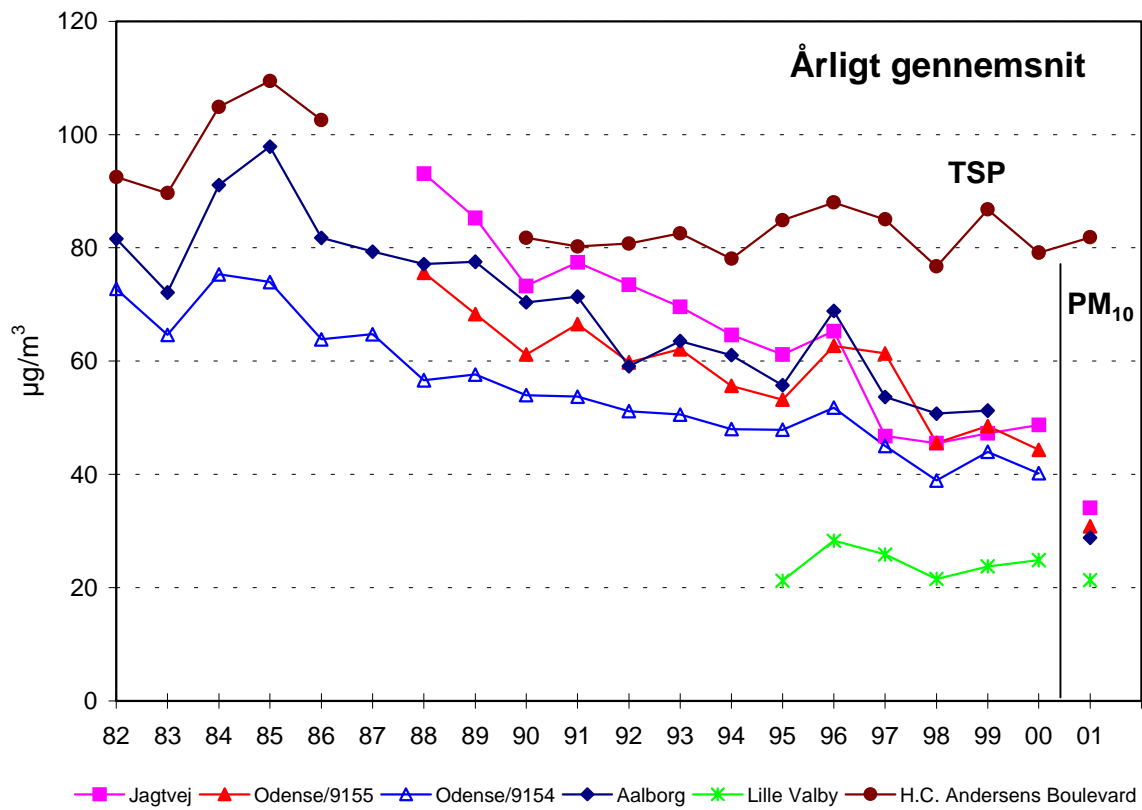
Udviklingstendenser

Udviklingstendenserne *Figur 4* på målestationer på trafikerede gader og en målestation i et landdistrikt ca. 40 km vest for København er vist i *Figur 4*. Den generelle udviklingstendens har været faldende over en årrække, formentlig især på grund af bedre "husholdning" ved byggerier, andre konstruktionsarbejder, industrier, "grønne marker" om vinteren m.v. Dette forventes at fortsætte de kommende år.

¹ Døgnmiddelværdien må overskrides 35 gange pr år før grænseværdien, som skal opfyldes i 2005, er overskredet, se afsnit 4.2.

² Døgnmiddelværdien må overskrides 7 gange pr år før grænseværdien, som skal opfyldes i 2010, er overskredet, se afsnit 4.2.

³ Grænseværdier for 2005 /2010.



Figur 4 Årlige gennemsnitsværdier og 95-percentiler for TSP (og PM_{10}) i Danmark fra 1982 til 2001

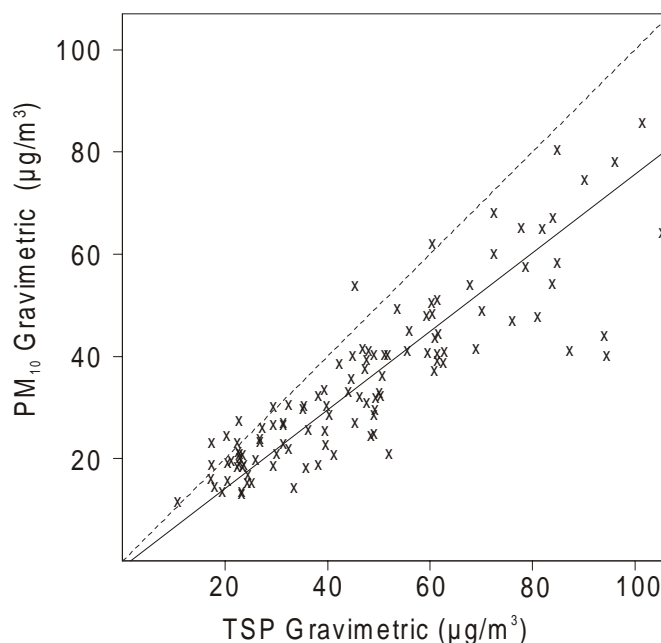
TSP er blevet målt på målestationen Lille Valby/2090 i næsten 8 år. Resultaterne ligger på et niveau mellem en tredjedel og halvdelen af niveauet i gadestationerne i byerne. På H.C. Andersens Boulevard ses ikke det samme fald som på de andre bystationer. Dette tyder på, at bidraget fra lokale kilder er vokset i løbet af 1990'erne.

Fine og ultrafine partikler

Partikler fra forbrændingsprocesser findes i den fine og ultrafine fraktion, og den del forventes at aftage i fremtiden på grund af emissionsreduktioner. Det er et resultat af bedre rensning af røggasser fra kraftværker m.v., krav om trevejs katalysatorer (TWC) på alle nye benzindrevne biler og begrænsninger i dieslbilerne udslip.

TSP/PM₁₀

Kontinuerte målinger af PM₁₀ blev startet i juli 1998 på Jagtvej i København. For at kunne give en vurdering af PM₁₀ på grundlag af TSP er der foretaget en sammenligning af samtidige målinger på Jagtvej. TSP viste sig generelt at være ca. 35% højere end PM₁₀, *Figur 5*. Dette svarer til, hvad man finder i andre byer. Da de store partikler dominerer både TSP og PM₁₀ vil ovennævnte måleresultater for TSP derfor stort set kunne transformeres til PM₁₀.



Figur 5 Sammenhængen mellem TSP og PM₁₀ på Jagtvej i København i 1998

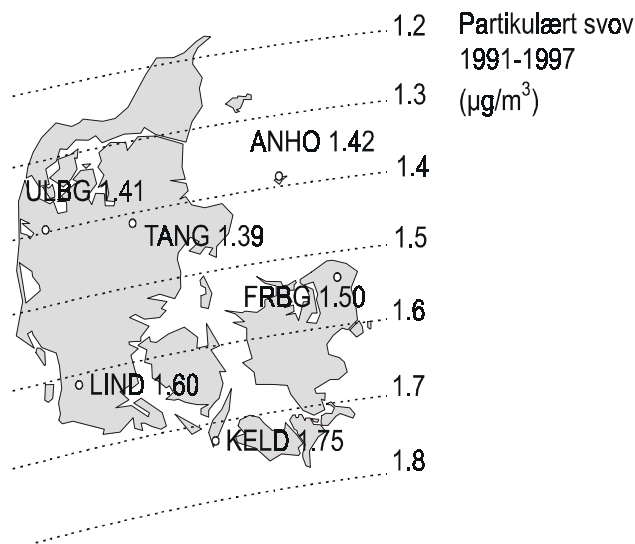
Fine partikler/PM_{2.5}

De fine partikler, den midterste fraktion i *Figur 1*, stammer som nævnt især fra forbrænding af fossile brændsler i Europa. En meget stor del af disse partikler er ammonium-sulfat og -nitrat, som er dannet fra ammoniak, SO₂ og NO_x. De udgør en meget stor del af PM_{2.5} i Danmark. De er typisk dannet i løbet af nogle døgn under transport fra Centraleuropa til Danmark. Koncentrationen varierer kun lidt over Danmark; *Figur 6* viser svovlkoncentrationens (svovl i partikler) gennemsnitlige fordeling over Danmark.

I byområder (bybaggrund) er forureningen med partikulært svovl (og nitrat) næsten den samme som i det åbne land. Kun i stærkt trafikerede gader er denne forurening lidt højere (20-40%) på grund af trafikens bidrag.

Mindre svovl

I de seneste 10 år er det sket et klart fald i koncentrationen af svovlholdige partikler over Danmark. Det skyldes først og fremmest reduktionerne i svovldioxidudslippet i Europa, specielt Østeuropa efter "Murens" fald.



Figur 6 Den geografiske fordeling af partikulært svovl målt på en række baggrundsstationer i Danmark.

Ultrafine partikler

Udslip af fine og især de ultrafine partikler sker specielt fra diesel- og benzindrevne biler, men disse partikler bidrager som nævnt kun lidt til massen af TSP og PM₁₀. Det er derfor nødvendigt at anvende andre måleteknikker end vejning for disse partikler. Desuden er der meget, der tyder på at antallet af ultrafine partikler, som kan trænge dybt ned i lungerne, er afgørende for udvikling af sundhedsskader. Antallet af ultrafine partikler måles med en SMPS, se afsnit 2.2.

Målinger i København og Odense

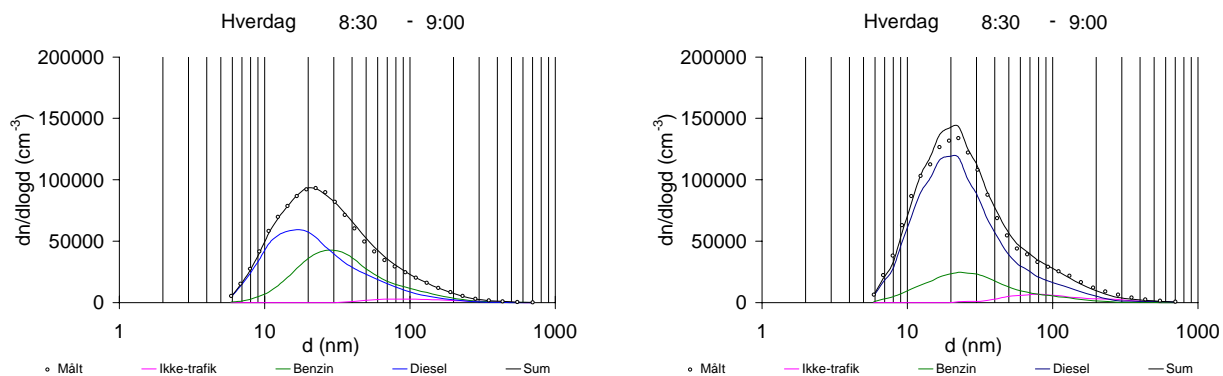
Målinger af ultrafine partiklers fordeling på størrelse er blevet gennemført på stærkt trafikerede gader i København (Jagtvej) og i Odense (Albanigade). Undersøgelser har vist, at ultrafine partikler ikke ændres væsentligt under den korte opholdstid i gaderummet, d.v.s. mindre end nogle få minutter. SMPS-metoden giver størrelsesfordelingen i området 0.01 – 0.7 µm. SMPS'en er også blevet anvendt i laboratoriet på udstødningsgas fra motorer.

En sikker bestemmelse af emissionen af partikler fra den aktuelle bilpark er nødvendig for undersøgelse af problemet i byområder, for undersøgelse af sundhedsskadelige effekter og for valg af metoder til reduktion af forureningen.

Benzin- og dieslbiler

Ved hjælp af en receptormodel-beregning (Wählin et al., 2001a), der omfattede partiklerne og de rutinemæssigt målte data af NO_x og CO, er partikkelstørrelsesfordelingen for henholdsvis benzin- og diesel-

drevne blevet bestemt. Eksemplerne i *Figur 7* viser, at benzin- og dieseldrevne bilers bidrag til partikelforureningen er næsten den samme på Jagtvej, fordi andelen af dieslbiler her er meget lille (ca. 6%). Bidraget med ultrafine partikler fra dieslbiler (ca. 12%) på Albanigade i Odense, som er en mere typisk gade, var meget højere end fra benzinbiler (Palmgren and Wåhlin, 1999). Senere undersøgelser har dog vist, at en stor del af det beregnede partikelbidrag fra benzinbilerne kan tilskrives moderne dieslbiler med oxiderende katalysatorer, fx. taxi'er.



Figur 7 Partikel antalsfordeling på Jagtvej i København i morgenmyldretiden.

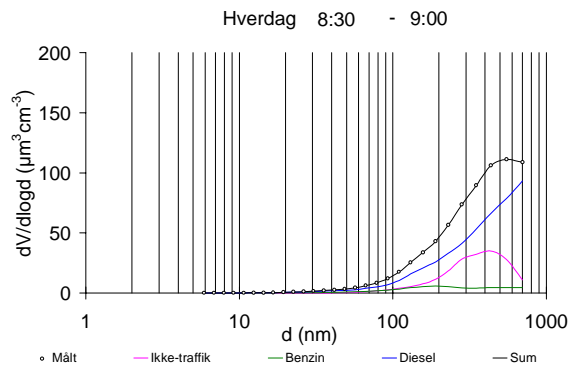
Partikel antalsfordelingen på Albanigade i Odense i morgenmyldretiden.

dN/dlogd

Det matematiske symbol ' $dN/dlogd$ ', der ses i *Figur 7* og i andre af de efterfølgende figurer kan oversættes til 'partikelkoncentration pr. størrelsesdekade'. Dette indebærer, at den totale partikelkoncentration N kan beregnes som arealet under kurven, hvor hver af de tre viste størrelsesdekader har længden 1.

Antal/masse

Som omtalt i kapitel 2 angives partikelkoncentrationen normalt som masse pr. m^3 luft og grænseværdierne i de samme enheder. For at kunne sammenligne antalsfordelingen med massefordelingen kan antalsfordelingen omsættes til massefordeling, idet man antager massefylden $1 g/cm^3$, *Figur 8*, som viser at dieselbidraget med ultrafine partikler i dette tilfælde er sammenlignelig med bidraget fra andre kilder end trafik. (En nærmere omtale findes i kapitlerne 7.2 og 7.3. Det er ikke muligt at sammenligne partikelkoncentrationen i de to gader, fordi målingerne blev udført i forskellige perioder med forskellige meteorologiske forhold. Dette vil dog kunne kvantificeres ved hjælp af luftkvalitetsmodeller.



Figur 8 Partikelantal på Albanigade i Odense omsat til volumen (eller masse, hvis man antager en massefylde på 1 g/cm^3).

Væskeformige partikler

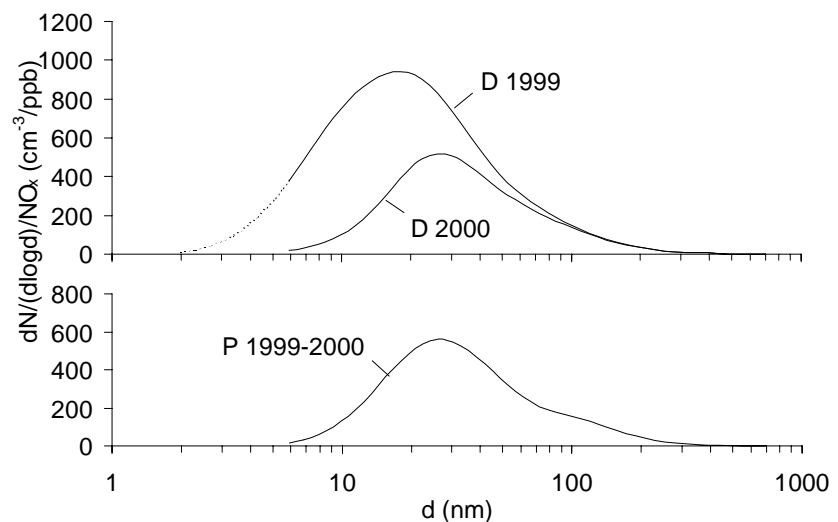
Antalsmæssigt dominerer de ultrafine partikler. Som det ses af Figur 7 findes i luften særligt mange meget små partikler fra dieselmotorer. Det er partikler i området 10-20 nm. Denne del af de ultrafine partikler betegnes ofte nanopartikler og består for det meste af væskedråber, fx. smøreolie, uforbrændt/delvis forbrændt dieselolie, forskellige flygtige organiske forbindelser og svovlsyre (og vand). De dannes i motorer og i eller umiddelbart efter udstødningsrøret.

Mindre svovl i diesel

I sommeren 1999 gik vi i Danmark over til dieselolie med lavere svovlindhold, fra maksimum 500 ppm til under 50 ppm. I samme periode blev der målt ultrafine partikler i København. På grundlag af målinger i vintrene 1999 og 2000 bestemte vi bidraget fra benzin- og dieselmotorer. Figur 9 viser klart, hvorledes antallet af nanopartikler fra dieselmotorer blev stærkt reduceret ved overgang til dieselolie med lavere svovlindhold. Dannelse af disse væskeformige partikler afhænger af en række andre forhold, hvoraf udetemperaturen er vigtig. Det betyder, at de ikke dannes under varmere himmelstrøg og kun i mindre omfang om sommeren i Danmark. I samme periode har vi konstateret (som ventet) at størrelsesfordelingen for benzinmotorer forblev uændret.

Yderligere reduktion af svovlindhold i diesel

Det viser sig, at svovlmængden ikke er tilstrækkelig til at forklare den samlede masse af disse partikler. Årsagen er, at de ekstremt små svovl(syre) partikler fungerer som kim for partikler, der dannes ved absorption af forskellige flygtige stoffer, bl.a. organiske forbindelser, på disse kim. Hvis antallet af disse kim kommer under en vis grænse vil dette ikke ske, fordi fortyndingen vil ske før molekyler af flygtige stoffer kan nå at kondenseres på kimene. En yderligere reduktion af svovlindholdet vil derfor ikke nødvendigvis nedsætte partikeludslippet, men der kan være andre grunde til at nedsætte svovlindholdet, bl.a. længere holdbarhed af katalysatorer, anvendelse af nye motor-teknologier eller korrosion på motor og udstødningsystem.



Figur 9 Størrelsesfordelingen af partikler fra diesel- og benzinbiler i 1999 og i 2000, før og efter nedsættelse af svovlindholdet i diesel fra 500 ppm til under 50 ppm (Wählin & Palmgren, 2001b).

Faste kulholdige partikler

Den del af partiklerne som ikke er blevet fjernet ved reduktion af svovlindholdet i dieselbrændstof menes hovedsageligt at bestå af kulholdige faste partikler. De emitteres både fra benzin- og dieselbiler, men emissionen er langt den største fra dieslbiler. Disse faste partikler menes at være de mest skadelige.

2.4 Trafikken som kilde til luftforurening med partikler

Luftforurening i gader

Luftforureningen i fx en gade er en sum af bidrag fra trafikken i gaden, fra trafikken i de øvrige gader, andre kilder i byen, regionens kilder, det øvrige Danmarks kilder og udenlandske kilder. De enkelte bidrag varierer i tid som følge af emissionernes størrelse, omdannelse af forureningen, afsætning på overflader og de meteorologiske forhold, fx vindretning, vindhastighed, stabilitet mv. Dette gælder naturligvis også for partikler. Imidlertid er beskrivelse og vurdering af forureningen med partikler mere kompliceret end de fleste øvrige luftforureninger, bl.a. fordi det er nødvendigt ikke kun at angive koncentrationen, men også den kemiske sammensætning og størrelsesfordelingen. Masseangivelsen - PM_{10} eller $PM_{2.5}$ - er den hidtil mest almindelige måde, og disse mål er da også blevet anvendt over hele Verden, bl.a. af WHO (WHO, 2000), ved fastsættelse af grænseværdier for emissioner eller luftkvalitet. Den kemiske sammensætning bestemmes normalt også ved massen af de pågældende stoffer bundet til partiklerne.

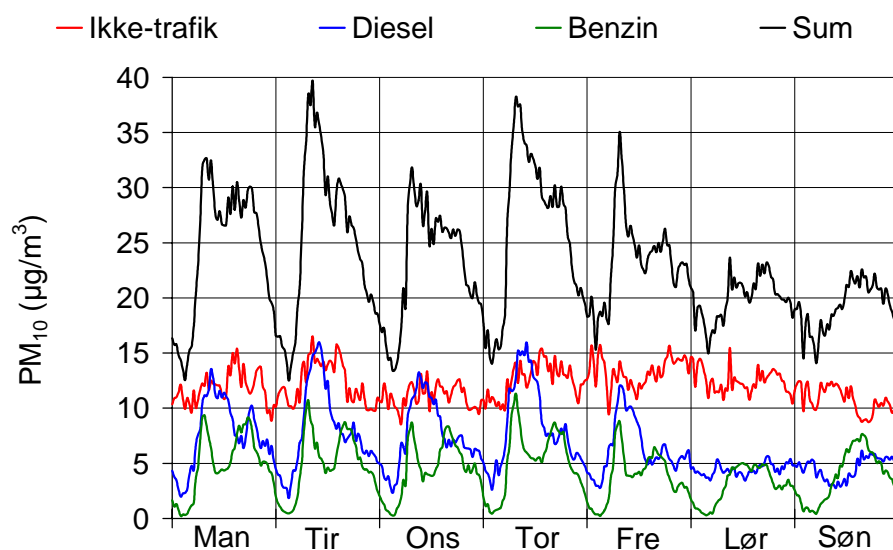
Trafikken emitterer mange typer af partikler

Mange kilder emitterer forskellige typer af partikler, i forskellige størrelser og kemisk sammensætning. Vejtrafikken er et eksempel på, at den samme kilde skaber partikler af vidt forskellig art afhængigt af dannelsesprocesserne. En del af partiklerne dannes i motoren, i udstødningssystemet eller umiddelbart udenfor udstødningrøret; disse partikler udgør for en stor del de fine og ultrafine partikler, som kun bidrager lidt til massen af fx PM_{10} . Andre partikler dannes som op-

hvirvlede partikler fra kørebanen, kørebaneslid, dækslid samt slid på bremses, koblinger m.v.; de er oftest grovere partikler, som bidrager væsentligt til PM_{10} , *Figur 1*. Udslip af NO_x fra biler i Centraleuropa giver, som omtalt i afsnit 2.1, anledning til dannelse af partikler under transport til Danmark.

Forskellige bidrag til PM_{10}

Figur 10 viser de beregnede bidrag til PM_{10} på Jagtvej i København. De tidligere omtalte receptormodelberegninger af benzin og diesels bilers bidrag til NO_x og det beregnede forhold mellem NO_x og partikler er blevet anvendt til at bestemme PM_{10} bidragene fra benzin- og diesels biler (Palmgren et al., 2001a). Disse bidrag inkluderer alle bidrag fra trafikken, bl.a. ophvirvlet støv og slid på kørebane, dæk, bremses m.v. Det ses, at trafikken bidrager med ca. 50% af PM_{10} på en trafikeret gade. Der er altså et væsentligt bidrag fra andre kilder, hvoraf fjerntransporterede partikler udgør den væsentligste del.



Figur 10 PM_{10} og beregnet bidrag fra benzin- og diesels biler og ikke-trafik kilder på Jagtvej i København på en gennemsnitsuge i 1999 (Palmgren et al., 2001b).

2.5 Emissionsmålinger på biler

Testlaboratorier

Undersøgelser af forskellige bilers udslip af bl.a. partikler sker i testlaboratorier, hvor den pågældende bil placeres på et såkaldt rullefelt. Her måles bilens udslip via udstødningsrøret ved forskellige hastigheder og belastninger. Målingen foretages under stationære forhold eller ved faste kørecykler, hvor hastighed og belastning gennemløber et bestemt skema med henblik på ensartet måling af forskellige biler og under forhold, der ligner normal blandet kørsel. Faste kørecykler anvendes ved typegodkendelse af biler.

Filtre på busser i Odense

I en større undersøgelse - iværksat af Færdselsstyrelsen - af effekten af filtre på offentlige tunge køretøjer i Odense blev der parallelt med målinger på gadeniveau foretaget nogle få målinger på rullefelt. Bl.a. er der foretaget målinger på busser med og uden partikelfiltre i forbindelse med Færdselsstyrelsens projekt i Odense, som gik ud på at undersøge effekten på luftkvaliteten af at sætte partikelfiltre på et

stort antal dieseldrøjetøjer. Målinger blev foretaget på Teknologisk Instituts testlaboratorium (Intern arbejdsrapport af Wåhlin & Palmgren, 2001)

Filtertyper

Der findes mange forskellige typer og fabrikater af filtre til dieseldrøjetøjer og undersøgelsen er langt fra komplet. Disse målinger og undersøgelser andre steder i Verden viser dog, at mange af filtrene har stor effektivitet (>90%) overfor partikler, også de ultrafine partikler. Der er dog også typer af filtre, som ikke virker, og som under visse forhold ligefrem producerer små partikler. Det er derfor vigtigt, at filtre testes og at der stilles krav om deres effektivitet og holdbarhed. Nogle motorfabrikanter er desuden i gang med at udvikle nye teknologier, som skulle reducere partikeludslippet væsentligt, men det er for tidligt at drage konklusioner.

Katalysatorer

Katalysatorer på benzinbiler viser sig at have stor effektivitet (>90%) over for partikler, også de ultrafine partikler. Dette er formentlig et resultat af at de gasformige stoffer fjernes i katalysatorerne, således at der ikke kan dannes partikler, fx. ved kondensation af benzin, smørelolie m.v. i udstødningen. Moderne persondieseldrøjetøjer er ofte udstyret med oxiderende katalysatorer, som på tilsvarende måde fjerner de gasser, der kan oxideres. Herved nedsættes/undgås dannelse af semi-flygtige partikler (diesel- og smørelolie og andre delvist forbrændte stoffer) og dermed udslippet af nogle af de ultrafine partikler.

2.6 Sammenfatning om partiklers egenskaber

Forskningsprogram på DMU

Partikelforureningen er et af de største luftforureningsproblemer i Danmark i relation til negative helbredseffekter. Der mangler megen viden internationalt på området, men der er også sat mange ressourcer ind på at forbedre denne viden. Også i Danmark har Miljø- og Energiministeriet sat undersøgelser i gang på DMU i samarbejde med en række andre institutioner og nyttig viden er allerede opnået.

PM₁₀/PM_{2.5}

PM₁₀/PM_{2.5} (massen af partikler) er hidtil blevet anvendt som mål for partikelforureningen, både i de gennemførte epidemiologiske undersøgelser og ved fastsættelse af normer. Imidlertid tyder meget på, at disse mål langt fra er tilstrækkelige; det er nødvendigt at inddrage andre egenskaber ved partiklerne. Det er klare tegn på, at især de meget små partikler (ultrafine) er de mest skadelige, og at det er deres antal der er afgørende. Vi kender dog endnu ingen klare årsags-sammenhænge mellem partiklernes egenskaber og helbredsmæssige skadevirkninger.

Trafikken den væsentligste kilde til små partikler

Der derimod ingen tvivl om, at trafikken er den væsentligste kilde til (især) ultrafine partikler i Danmark, og at vi især udsættes for dem i trafikerede gader, når vi færdes der eller bor eller arbejder i huse langs gaderne. Trafikken giver også anledning til forurening med grove partikler fra kørebane, dæk, bremses m.v. . Der findes effektive filtre til dieseldrøjetøjer til fjernelse af disse partikler, men de fjerner kun de partikler der udsendes via udstødningsrøret og heller ikke de gasformige stoffer, som kan føre til partikeldannelse. Katalysatorerne på benzinbiler synes også at være effektive.

Fjerntransport

En væsentlig del af partikelforureningen (fine partikler, PM_{2,5}) stammer fra SO₂ og NO_x emitteret i Centraleuropa og under transport omdannet til fine partikler. Partiklerne er hovedsageligt ammoniumsulfat og -nitrat. De grove partikler består for en stor del af naturligt støv og støv fra jordbrug og byggeri m.v.

Internationalt samarbejde

For at kunne gennemføre en effektiv indsats overfor skadevirkninger af partikelforureningen er det således nødvendigt både at kende partiklernes egenskaber og at kunne sætte dem i relation til skadevirkningerne. Det nytter således ikke at reducere udslippet af partiklerne målt som masse, hvis det er antallet, der er det væsentlige, eller at reducere antallet, hvis det er visse kemiske stoffer, der er væsentlige. Disse forhold ventes at blive afklaret i de kommende år i et omfattende internationalt samarbejde.

Partikler og helbredsskader

Der er således store bestræbelser for at reducere partikeludslippet, men det er absolut nødvendigt, at man ikke - som hidtil - kun har reguleret på massen af partikeludslippet, men at man også sætter normer for andre parametre, fx antal, størrelsesfordeling, kemisk sammensætning m.v. i takt med at det etableres ny viden om partiklernes helbredsmæssige skadevirkninger.

3 Sundhedsmæssig vurdering af partikulær luftforurening

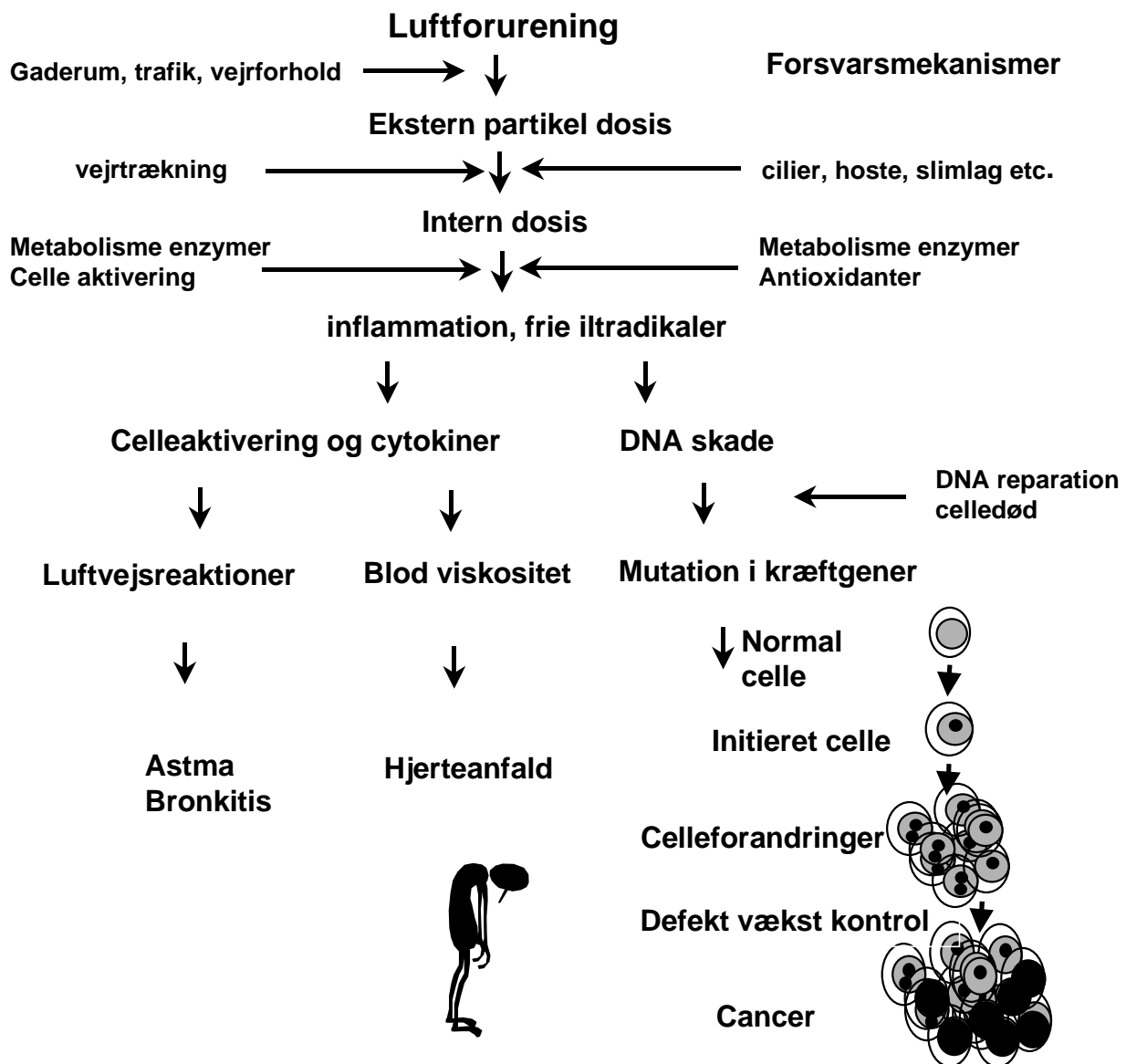
3.1 Generelt om helbredseffekter

Partikler og helbredseffekter

Partikulær luftforurening har længe været kendt som sundhedsskadelig. Fokus er primært på luftvejssygdomme og hjertekarsygdomme. I de senere år er opmærksomheden blevet rettet mod størrelsesfordelingen af luftforureningspartikler, som betydende for sundhedseffekterne. Meget tyder på, at meget små partikler udgør et af de alvorligste sundhedsmæssige forureningsproblemer.

Deposition af PM_{10}

Partikler med diameter over 10 μm vil hovedsagelig deponeres i de øvre luftveje (næse/svælg), mens partikler under 10 μm (PM_{10}) kan deponeres længere nede i bronkierne. Mindre partikler kan nå helt ud i lungeblærerne (alveolerne). Partikler, der er aflejret i bronkierne, fjernes relativt hurtigt på grund af fimrehårenes bevægelser, mens de partikler, der når alveolerne, kræver optagelse i såkaldte makrofager for at kunne fjernes. Jo mindre partikler er, des større overflade har de per vægtenhed og dermed mulighed for at stoffer, der er bundet på partikler, kan reagere med cellerne i alveolerne og makrofagerne. Se iøvrigt *Figur 11*.



Figur 11 Skematisk oversigt over sammenhæng mellem luftforurening og helbredseffekter.

Ultrafine partikler

De mindste ultrafine partikler under $0,1 \mu\text{m}$ (100 nm) i diameter har særlig stor overflade per vægtenhed. De kan trænge ind i lungevævet (interstitialiseres) og endda føres videre ad blodbanen. Fraktionen af ultrafine partikler, der deponeres i lungerne, øges med mindsket partikelstørrelse og med dybere, længerevarende vejtrækning. Ultrafine partikler deponeres i lungerne via diffusion, hvorimod større partikler deponeres ved impaktion og sedimentation. Ultrafine partikler kan også hæmme makrofagernes funktion. Et vigtigt led i sygdomsprocesserne synes at være igangsætning af inflammation (betændelsesreaktioner), som i sig selv medfører en række skader. Hvilke skader, der forvoldes, afhænger således i høj grad af dels af partikelstørrelsen og dels af den kemiske sammensætning, herunder hvilke stoffer, der måtte være adsorberet på partiklernes overflade. Nyere data peger på, at de fine partikler (mindre end $2,5 \mu\text{m}$) og især ultrafine partikler (under $0,1 \mu\text{m}$) udgør den største sundhedsmæssige trussel, idet disse fraktioner dels har en kraftig påvirkning på lungevævet og dels påvirker blodets viskositet og hjertekredsløbet.

3.2 Befolkningsundersøgelser

Akutte og kroniske effekter

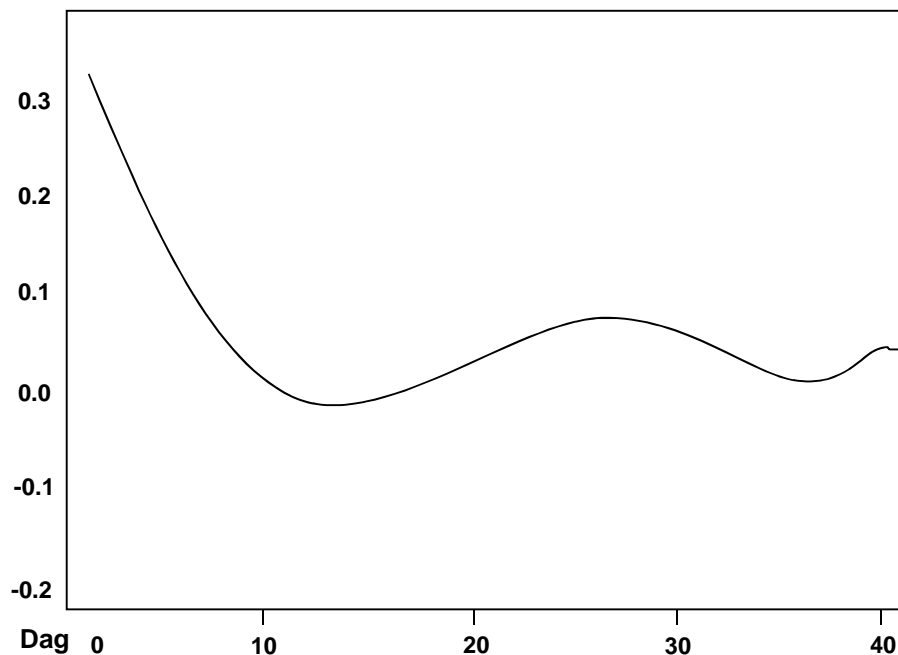
Der er udført talrige befolkningsundersøgelser til vurdering af partikelforureningens sundhedsskadelige effekter. De fleste undersøgelser har drejet sig om akutte effekter, der optræder i forbindelse med forhøjede partikelkoncentrationer, hvor især PM_{10} har været benyttet som mål for partikeleksponering. Effekterne har først og fremmest været forekomst og indlæggelser for luftvejsymptomer og luftvejslidelser, foruden akut hjertesygdom. En række andre især kohortebaserede undersøgelser har været rettet mod kroniske effekter, især i form af total og årsagsspecifik mortalitet i relation til partikelforurening.

Epidemiologisk evidens for PM_{10}

Der er betydelig og konsistent epidemiologisk evidens for at PM_{10} -fraktionen af partikulær luftforurening er associeret med helbredsproblemer. Der er en påfaldende konsistens mellem 19 studier, der viser korrelation mellem daglig mortalitet, morbiditet og stigninger i PM_{10} (Anderson, 2000). Anderson konstaterer også i denne oversigtsartikel at partikler har effekter, der er uafhængige af effekter forårsaget af irriterende gasser i luftforurening (NO_x , SO_2 og ozon). Der er stort set enighed om, at der er kausal sammenhæng mellem luftforurening og helbredseffekter, og at partikler bidrager væsentligt til dette.

Internationale undersøgelser

Der er tiltagende interesse for at adskille bidraget fra de forskellige partikler som årsagsfaktorer ved både akutte og kroniske effekter. Der er kun få studier, hvor grove, fine og ultrafine partikler adskilles. I studier af sammenhænge mellem partikler og daglig mortalitet findes den største effekt på eksponeringsdagen eller dagen efter (Dockery & Pope, 1994; Schwartz, 1994; Bascom et al, 1996; Katsouyanni et al, 1997; Pope & Dockery, 1999). For studier med måling af både PM_{10} og $PM_{2.5}$ var mortaliteten bedst associeret med sidstnævnte (Dockery et al, 1993; Schwartz et al 1996). I den hidtil eneste undersøgelse af mortalitet i relation til ultrafine partikler kunne man ikke statistisk adskille denne sammenhæng fra $PM_{2.5}$, selvom der var en tendens til umiddelbare effekter af $PM_{2.5}$ og forsinkede effekter (4-5 dage) af ultrafine både mht. hjerte- og lungerelaterede dødsårsager (Wichman and Peters, 2000), *Figur 12*. I tre undersøgelser af voksne patienter med astma var associationen med anfald stærkest for ultrafine partikler, mindre stærk for fine partikler, mens der slet ikke kunne findes association med PM_{10} (Peters et al., 1997; Wichmann and Peters, 2000). I et tilsvarende studium med børn var associationen mellem astmaanfald og partikler dog bedst knyttet til PM_{10} og sod, men ikke til fine og ultrafine partikler (Pekkanen et al., 1997). Der er flere europæiske og amerikanske undersøgelser af sammenhænge mellem ultrafine partikler og hjertekarsygdomme på vej.



Figur 12 Procent ændret dødelighed per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} i 40 dage efter fra APHEA2 i 10 Europæiske Byer (Epidemiology 2002).

Kroniske effekter

Amerikanske befolkningsundersøgelser

De mest omtalte undersøgelser til vurdering af den kroniske effekt er to store amerikanske befolkningsundersøgelser, som blev publiceret i midten af 1990'erne, hvor partikelniveauet er sat i forbindelse med dødeligheden. Den ene undersøgelse omfatter ca. 8.000 mennesker i 6 større byer (Dockery et al., 1993), mens den anden omfatter ca. 550.000 mennesker i 151 byområder (Pope et al., 1995). I undersøgelseerne er der taget højde for en række samvirkende faktorer som alder, race, rygevaner, alkoholforbrug m.m. Undersøgelseerne viser, at der er en direkte sammenhæng mellem dødelighed og partikelniveau (bestemt som $\text{PM}_{2.5}$) i byerne. Den øgede dødelighed kommer især til udtryk blandt personer med luftvejslidelser og hjerte/karlidelser. Det skal pointeres, at undersøgelserne er baseret på det generelle partikelniveau, og at der ikke indgår specielle vurderinger omkring trafikens bidrag. Det har været diskuteret i hvilken udstrækning den øgede dødelighed vil påvirke gennemsnitslevealderen i befolkningen. WHO har med baggrund i de to nævnte amerikanske undersøgelser beregnet, at en forøgelse af det gennemsnitlige $\text{PM}_{2.5}$ -niveau med $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (svarende til en forøgelse på ca. 50%) vil resultere i et fald i den forventede middellevealder på ca. 1 år. Andre amerikanske undersøgelser gennemført i perioden 1987-1993 indikerer en forøgelse i forekomsten af bronkitis og kronisk hoste på 10-25% ved en stigning i PM_{10} -niveauet på $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Det kan tilføjes, at de californiske myndigheder efter mange års undersøgelser har konkluderet, at udstødningssgassen fra dieslbiler er toksisk, og at de amerikanske miljømyndigheder har karakteriseret dieseludstødningen som "likely human carcinogen".

Nye amerikanske undersøgelser

Opdatering vedr. $\text{PM}_{2.5}$

Pope et al. har i 2002 opdateret deres undersøgelse efter at have fulgt den samme population til år 1999. Der er målt $\text{PM}_{2.5}$ igen i 1999-2000.

Der er benyttet forbedrede statistiske modeller og der indgår en række andre mål for luftforurening for hele perioden, herunder også mål for andre partikelfraktioner end $PM_{2.5}$. Det betyder at datagrundlaget er blevet markant forbedret og det er muligt at udtale sig mere sikkert om sammenhænge mellem partikler og helbredsaffekter, herunder også om man kan følge effekter helt frem til år 1999

Bekræftelse af tidligere resultater

Resultatet af den nye undersøgelse blev en understregning af resultaterne fra 1995. Der fandtes en statistisk meget sikker sammenhæng mellem dødelighed og $PM_{2.5}$ niveau. Der var et betydeligt fald på ca. 1/3 i $PM_{2.5}$ niveau fra 1979-83 til 1999-2000 for alle måleområderne. Dødeligheden steg med 4% per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stigning i $PM_{2.5}$ koncentrationen målt i 1979-83 eller med 6% per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stigning i $PM_{2.5}$ målt i 1999-2000 og ved brug af et vægtet gennemsnit over hele perioden. Dødelighed af hjerte/lungesygdomme steg med 9% og af lungecancer med 14% per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stigning i $PM_{2.5}$ målt som et vægtet gennemsnit mellem 1979 og 2000.

$PM_{2.5}$ og lungecancer

Den tydelige sammenhæng mellem $PM_{2.5}$ niveau og lungecancer, som især var klar hos ikke-rygere, var ikke klar i 1995. Det er foreneligt med at en svensk undersøgelse af risiko for lungekræft associeret med trafikgenereret luftforurening målt som NO_2 , hvor effekten så ud til at have en lang latenstid.

Danske vurderinger

Miljøstyrelsens vurdering

Det er Miljøstyrelsens opfattelse, at der i Danmark er en lignende sammenhæng mellem partikelniveauer og sundhedsskadelige effekter, som man har fundet i USA ved sammenlignelige partikelniveauer. Miljø- og Energiministeriets og Sundhedsstyrelsens fælles luftgruppe har på den baggrund vurderet, at en reduktion i $PM_{2.5}$ -niveauet med $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (svarende til en reduktion på 25-30%) i Danmark kan forventes at medføre et fald i den årlige dødelighed på ca. 400 personer pr. million mennesker i trafikbelastede byområder. Luftgruppen har også som et foreløbigt og usikkert skøn vurderet, at en reduktion i $PM_{2.5}$ -niveauet med $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ vil medføre, at der blandt 200.000 børn vil forekomme 1.700 færre børn med bronkitissymptomer.

Embedslægens vurdering

I Københavns kommune blev der i 1999 gennemført beregninger, som viser, at der sker mellem 100 og 280 for tidlige dødsfald, der kan tilskrives udsættelse for PM_{10} . Embedslægen i København har efter en revision af beregningsforudsætningerne oplyst, at de anførte tal er baseret på en konservativ vurdering, og at de meget vel kan ligge betydeligt højere. De københavnske beregninger viser også, at udsættelsen for PM_{10} medfører 190-540 ekstra hospitalsindlæggelser, overvejende blandt personer med lungesygdom og blandt ældre. Det fremgår i øvrigt af beregningerne, at forureningen med PAH (polycykliske aromatiske kulbrinter) skønnes at medføre 1-3 ekstra tilfælde af lungekræft pr. år.

WHO-projekt

Østrig, Frankrig og Schweiz

Et meget omtalt projekt til vurdering af partikelforureningens sundhedsmæssige konsekvenser er gennemført af et forskerteam fra Østrig, Frankrig og Schweiz. Projektet blev præsenteret ved WHO's ministerkonference for miljø og sundhed i London i juni 1999 "Health Costs due to Road Traffic-related Air Pollution" (www.who.dk/london99/transport04.htm). Man har anvendt PM_{10} som indikator for luftforureningen og har beregnet den eksponering af PM_{10} , som befolkningen i de 3 lande bliver udsat for. På baggrund heraf har man med udgangspunkt i foreliggende litteratur beregnet antallet af personer med for tidlig død og antallet af forskellige former for sygelighed, der kan henføres til luftforurening fra vejtrafik. Beregningerne er foretaget med udgangspunkt i situationen i 1996. For at kunne vurdere trafikens bidrag har man foretaget beregninger for en fiktiv situation, hvor al vejtrafik er fjernet. Forskellen mellem de to situationer er herefter tilskrevet vejtrafikens bidrag. For Schweiz (ca. 7 mio. indbyggere) viser beregningerne, at det nuværende niveau af PM_{10} medfører ca. 3.300 tilfælde af for tidlig død pr. år, hvoraf ca. 1.800 kan tilskrives vejtrafikken. Beregningerne viser endvidere ca. 45.000 tilfælde af akut bronkitis hos børn (hvoraf ca. 24.000 kan tilskrives vejtrafik), 4.200 tilfælde af kronisk bronkitis hos voksne (hvoraf 2.200 kan tilskrives vejtrafik) og 2,8 mio. dage med nedsat aktivitet (hvoraf 1,5 mio. kan tilskrives vejtrafik). Beregningerne siger ikke noget om effekten af en isoleret reduktion af partikelemissionen.

Omkostninger

Man har også i det nævnte projekt prøvet at sætte omkostninger på de beregnede effekter. Udgangspunktet har været princippet om "willingness-to-pay" for "the value of a prevented fatality (VPF)". Der er gennemført beregninger med en VPF-værdi på 0,9 mio. Euro. For Schweiz er omkostningerne ved for tidlig død opgjort til ca. 3.000 mio. Euro (hvoraf ca. 1.600 mio. Euro fra vejtrafik). Omkostninger forbundet med sygelighed er opgjort til ca. 1.200 mio. Euro (hvoraf vejtrafikken bidrager med ca. 600 mio. Euro). Hovedparten af omkostningerne for sygelighed falder inden for grupperne kronisk bronkitis hos voksne (75%) og dage med nedsat aktivitet (22%).

3.3 Sundhedsvurdering

Den nye amerikanske undersøgelse

Den nye amerikanske undersøgelse (Pope et al. 2002) udgør den til dato sikreste dokumentation for sammenhængen mellem lang tids udsættelse for fine partikler i byområder og øget dødelighed i befolkningen som følge af hjertekredsløbsslidelser, luftvejslidelser og lungercancer. Partikler større end $PM_{2.5}$ synes ikke at have betydning for dødeligheden. Det betyder alt andet lige at ultrafine partikler får større relativ vægt selvom de stadig masse-mæssigt repræsenterer en mindre del af $PM_{2.5}$. Den stærke sammenhæng mellem $PM_{2.5}$ og dødelighed kan følges helt op til år 1999, hvilket tyder på at det fortsat er et væsentligt helbredsproblem. Det må dog erindres at nogle langtidseffekter som lungercancer er måske 20 år om at udvikles og her har niveauet i 1999-2000 næppe spillet en direkte rolle. Niveauet af $PM_{2.5}$ i de amerikanske områder er gennemsnitligt tæt på forholdene Danmark. Imidlertid peger den amerikanske undersøgelse ikke på trafik som kilde til sundhedseffekterne. Således har trafikrelaterede gasser som NO_2 og CO ingen prædiktiv værdi for dødeligheden,

hvorimod sulfat partikler og svovldioxid har signifikant effekt, om end den for en gennemsnitseksposering er mindre end den tilsvarende effekt af $PM_{2.5}$. Det tyder på, at stationære kilder er væsentlige i de amerikanske byområder. Det kan betyde en øget usikkerhed ved brug af dosis-responsammenhænge mellem $PM_{2.5}$ og dødelighed baseret på den amerikanske undersøgelse på partikler til risikovurdering af partikler fra trafikrelaterede kilder. Mange egenskaber af betydning for helbredseffekter er dog ens for partikler af faststof, men den kemiske sammensætning har i øvrigt har også betydning.

Størrelsesfraktioner af partikler og helbredseffekter

Ultrafine partikler

I det følgende resumeres egenskaber af betydning for helbredseffekter af ultrafine partikler, hvor der i øvrigt henvises til rapporten fra 2001, og nye epidemiologiske undersøgelser af sammenhænge mellem dødelighed og ultrafine partikler

Deponering af partikler i lungerne

Deponeringen af inhalerede partikler i luftvejene er bestemt af partiklernes størrelse, anatomi af luftvejene og vejrtrækningen (Sarangapani et al., 2000). Grove partikler deponeres hovedsagelig i de øvre luftveje. Partikler under $10 \mu m$ kan deponeres længere nede i bronkierne, hvor de fjernes v.h.a. ciliernes bevægelser. Fine og ultrafine partikler kan nå helt ud i alveolerne (Donaldson et al., 2001), hvor der ikke er cilier, og de fjernes derfor af makrofager eller trænger ind i lungevævet. Fraktionen af partikler, der deponeres i lungerne, øges med mindsket partikelstørrelse og med dybere, længerevarende vejrtrækning (Jacques et al., 2000). Ultrafine partikler deponeres i lungerne via diffusion, hvorimod større partikler deponeres ved impaktion og sedimentation.

Partikler i dansk luft

I Danmark består $PM_{2.5}$ overvejende af langtransporterede partikler af ammoniumsulfat og ammoniumnitrat foruden partikler fra trafikken, som er ultrafine eller i akkumuleringsfasen. Ammoniumnitrat og ammoniumsulfat er vandopløselige, men der er ingen sikker viden om de biologiske effekter af disse stoffer i partikelform. Det må dog erindres at sulfatholdige partikler i de amerikanske undersøgelser var knyttet til dødelighed. Ultrafine partikler består af væske eller fast stof. Væskepartikler forventes let at kunne opløses på de øvre luftvejes overflader og vil der kun i begrænset omfang nå nedre luftveje. Ultrafine partikler af fast stof består typisk hovedsageligt af elementært kulstof og har et vekslende indhold af polyaromatiske kulbrinter (PAH) og metaller, som er bundet til overfladen (Cass et al. 2000). Det må antages at partikler af fast stof med kemisk sammensætning som ultrafine partikler vil være mest aktive i at inducere inflammation og direkte skade på luft-vejscellerne (Ghio et al 2001). Ydermere er ultrafine partikler i stand til at trænge i gennem cellerne i luftvejene og kan findes i lungevævet og vil cirkulere med kredsløbet.

Nye europæiske undersøgelser af akutte effekter

Enkelte nye undersøgelser har vist, at associationen med lungesygdom hos voksne og mortalitet er stærkere for den ultrafine fraktion af partikler end $PM_{2.5}$ og PM_{10} alle målt i bybaggrund (Wichmann & Peters, 2000). Den eneste undersøgelse med kvantitative estimater er gennemført som et tidsseriestudie i Erfurt, en by med ca. 300.000 indbyggere i Tyskland 1995 til 1998 (Wichmann et al. 2000). Daglig årsagsspecifik mortalitet blev registreret sammen med måling af størrelsesfordeling som antalskoncentration af ultrafine og fine partikler

foruden masse af fine og grove partikler. Kilden til ultrafine partikler var hovedsageligt trafik. $PM_{2.5}$ og PM_{10} var kun moderat korreleret med ultrafine partikler. Regressionsanalyse viste at den relative risiko relateret til total mortalitet for en stigning svarende til interkvartil område (dvs. fra 8000 til 20700 partikler med diameter mellem 10 og 100 nm) af ultrafine partikler var 1,046 (95% konfidensinterval 0,997-1,097) med lagtime på 4 dage. Effekten var mest knyttet til luftvejsrelateret mortalitet med relativ risiko på 1,16 (1,06-1,29) og kardiovaskulær mortalitet med relativ risiko på 1,06 (1,01-1,12). For $PM_{2.5}$ var de relative risici for stigning svarende til interkvartil område tilsvarende. Effekten af ultrafine og $PM_{2.5}$ var ved samanalyse næsten uafhængige. Det bemærkes at effekten af ultrafine var helt uafhængig af en ret stærk effekt af SO_2 med relativ risiko på ca. 1,06 (1,01-1,11) for interkvartil område. NO_2 og CO havde tilsyneladende også effekter, som blev reduceret ved samanalyse med ultrafine, hvilket støtter at trafikemission er ansvarlig. Endelig havde også PM_{10} effekt, men dette er ikke samanalyseret med ultrafine. Der var ikke signifikante forskelle i latenstid for de forskellige helbredseffekter relateret til ultrafine og fine partikler.

Kroniske effekter

I sammenhængen skal det bemærkes det, at tidsseriestudier kun kan belyse akutte effekter af luftforurening, men ikke kroniske effekter som fx lungecancer, og derfor regnes for at underestimere de samlede effekter. Yderligere har den omtalte undersøgelse benyttet en relativ kort latenstid på op til 5 dage og det er muligt at effekter på dødelighed kan spores i op til 40 dage (Zanobetti et al. 2002). I den undersøgelse som bygger på PM_{10} niveauer og dødelighed i 10 europæiske byer fandtes en 0.7% stigning i dødelighed per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ stigning i PM_{10} ved én dags latenstid, men 1.6% stigning ved 40 dages latenstid. Bemærk forskellen op til 4% stigning per $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ PM_{10} som findes i langtidsstudier.

Virkning af ultrafine partikler

En endnu ikke publiceret undersøgelse har vist at ændringer i hjerterytme og tegn på truende blodprop i hjertet er associeret til stigninger i niveauet af ultrafine partikler i Erfurt, Helsinki og Amsterdam (Anette Peters, personlig meddelelse). Ved sammenligning af effekten af eksponering af henholdsvis ultrafine og fine partikler på rotter, er det vist, at de ultrafine partikler forårsagede et større inflammatorisk respons. Inflammationsinducerende effekter af ultrafine partikler er også fundet ved eksperimentel udsættelse af mennesker for dieseludstødning eller koncentreret byluft (Salvi et al., 1999; Ghio et al., 2000)). Disse fund er i overensstemmelse med at Seaton et al. (1995) fremkom med en hypotese, om at de ultrafine partikler forårsager alveolær inflammation, hvorved der frigives mediatorer, som bl.a. fremkalder anfald af akut respiratorisk sygdom hos følsomme individer. Det øgede antal dødsfald pga. kardiovaskulære sygdomme, mente de, kan forklares ved ændringer i blodkoagulabilitet og aktivering af granulocytter. Denne ændring i blodkoagulabiliteten kan ske via lokal produktion af prokoagulationsfaktorer i lungerne eller via mediatorer fra lungerne, som ved påvirkning af leveren kan medføre øget niveau af prokoagulationsfaktorer i blodet. Partikler formodes således især at virke helbredsskadelige ved at påføre oksidativt stress via inflammation og deres indhold af overgangsmetaller, der kan generere frie ilt-radikaler, hvor ultrafine er særligt aktive.

Epidemiologiske studier

De få epidemiologiske undersøgelser baseret på tidsseriedesign og eksperimentelle undersøgelser giver meget begrænset mulighed for direkte kvantitative estimater af sammenhæng mellem størrelsesfraktioner af partikler og helbredsudfald. De peger dog entydigt på at en given masse af ultrafine partikler har væsentligt større helbredseffekter end den samme masse af større fine partikler endsige af grove partikler. Det eneste eksisterende estimat angiver en stigning i akut dødelighed på omkring 4,5% med sikkerhedsgrænser fra et fald på 0,05% til en stigning på 11% for en stigning fra 8000 til 20.700 ultrafine partikler per ml .

4 Grænseværdier og emissionsbegrænsninger

4.1 EU-lovgivningen

EU lovgivningen om luftforurening er tosidig. Den omfatter dels regler om luftkvaliteten og dels regler for kilder og produkter. I nærværende rapport gives en oversigt over EU-direktiverne om luftkvalitet samt en oversigt over reglerne for partikelemissioner fra trafikken, som bidrager væsentligt til partikelforurening i Danmark.

4.2 EU-direktiver for luftkvalitet og danske bekendtgørelser

Rammedirektiv

Det såkaldte Rammedirektiv - "Rådets Direktiv 96/62/EF af 27. september 1996 om vurdering og styring af luftkvalitet" - blev vedtaget i september 1996 (EC, 1996). Det næste tiltag var "Rådets beslutning 97/101/EF af 27. januar 1997 om oprettelse af en gensidig udveksling af information og data fra net og individuelle stationer, der måler luftforurening i medlemslandene" (EC, 1997). Disse to dele af lovgivningen skal give en mere fyldestgørende og gennemsigtig ramme for tiltag til at forbedre luftkvaliteten i EU.

Formål

Rammedirektivet har følgende hovedformål, der skal fastlægge grundlæggende principper for en fælles strategi med det sigte:

- at definere og fastlægge mål for luftkvaliteten i Fællesskabet med henblik på at undgå, forhindre eller begrænse skadelige virkninger på menneskers sundhed og på miljøet som helhed,
- at vurdere luftkvaliteten i medlemsstaterne på grundlag af fælles metoder og kriterier,
- at skaffe tilstrækkelige oplysninger om luftkvaliteten og at sørge for, at de stilles til rådighed for offentligheden bl.a. gennem tærskelværdier for forureningsvarsling,

at bevare luftkvaliteten, når den er god, og forbedre den i andre tilfælde.

Datterdirektiver

Rammedirektivet sætter ikke i sig selv luftkvalitetsmål, tidsfrister eller detaljer om monitoringsmetoder. Det giver derimod den basale struktur, som skal udfyldes for de enkelte forurenende stoffer ved hjælp af den såkaldte "datterlovgivning" (datterdirektiver).

Rammedirektivet fastsætter, at grænseværdier og tærskelværdier fastsættes på basis af arbejder udført af internationale videnskabelige organisationer på området. Det er her især resultater fra WHO (WHO, 2000), der bliver anvendt. De første 3 datterdirektiver (EC, 1990, EC, 2000 og EC, 2002) er vedtaget og der forligger et forslag til det 4. En oversigt over vedtagne grænseværdier, målværdier og tærskelværdier er givet i *Tabel 2*

Tabel 2 Grænseværdier, målværdier og tærskelværdier i Danmark, som følge af EU-lovgivningen.

Stof	Grænseværdi ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Midlingstid	Statistik	Beskyttelse af	Skærings- dato
NO ₂	200	1 time	18 gange pr. år	Mennesker	2010
	40	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
NO _x	30	-	Gennemsnit, år	Vegetation	2010
SO ₂	350	1 time	24 gange pr. år	Mennesker	2005
	125	24 timer	3 gange pr. år	Mennesker	2005
	20	-	Gennemsnit, år og vinter	Økosystemer	2001
Partikler (PM ₁₀)	50	24 timer	35 gange pr. år	Mennesker	2005
	40	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
	50	24 timer	7 gange pr. år	Mennesker	2010
	20	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
Bly	0,5	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
Benzen	5	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2005
CO	10.000	8 timer (glidende)	Maks.	Mennesker	2005
Ozon	120 ¹	Maks. 8 timer (glidende)	25 dage pr. år gns. 3 år	Mennesker	2010
	120 ²	Maks. 8 timer (glidende)	1 dage pr. år	Mennesker	2020 (benchmark)
	180 ³	1 time	Maks.	Mennesker	2003
	240 ⁴	1 time	Maks. over 3 timer	Mennesker	2003
	18.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{timer}$)	AOT40	Maj – juli	Vegetation	2010
6.000 ($\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{timer}$)	AOT40	Maj – juli	Vegetation	2020 (benchmark)	
As ^{5,6}	0,006	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
Cd ^{5,6}	0,005	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
Ni ^{5,6}	0,02	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
Benz(a)- pyrene ^{5,6}	0,001	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010
Hg ⁴	0,05	-	Gennemsnit, år	Mennesker	2010

¹) Målværdi

²) Langsigtet målsætning

³) Tærskelværdi for information

⁴) Tærskelværdi for varsling

⁵) Forslag

⁶) I PM₁₀

4.3 Krav til emissioner fra vejtrafik

I EU har man fastsat krav til emissioner fra vejtrafik for at stille ensartede krav i Europa med henblik på at reducere luftforureningens skadevirkninger på mennesker, økosystemer og vegetation. Indsatsen har især været rettet mod at begrænse udslippet af de såkaldte regulerede forureninger: CO, HC, NO_x, og partikler (fra dieseldrevne køretøjer).

De første tiltag i 1970'erne

Den væsentligst miljøproblem i perioden fra 1970 og frem til indførelsen af udstødningsnormer, der forudsatte anvendelse af katalysatorer, var uden blyindholdet i benzin. Der blev vedtaget direktiver, som indebar, at blyindholdet (og dermed emissionen af partikler på vægtbasis) blev reduceret til 0,15 g/l. Der blev også indført skærpelse af udstødningsnormer, men i praksis var der alene tale om tilpasning til den tekniske udvikling. Udstødningsnormerne skulle demonstreres i forbindelse med typegodkendelse af prototype af det givne køretøj.

Euro 1 og Euro 2

I 1980'erne begyndte luftforureningsproblemerne for alvor at komme i fokus i EU, især med baggrund i skovdøden. I EU vedtog man de såkaldte Euro 1 normer, som forudsætter katalysatorer på benzindrevne biler. Det skete i 1993 (i Danmark dog allerede i 1990). Der blev fra 1996 indført en mindre skærpelse (Euro 2).

Auto/Oil

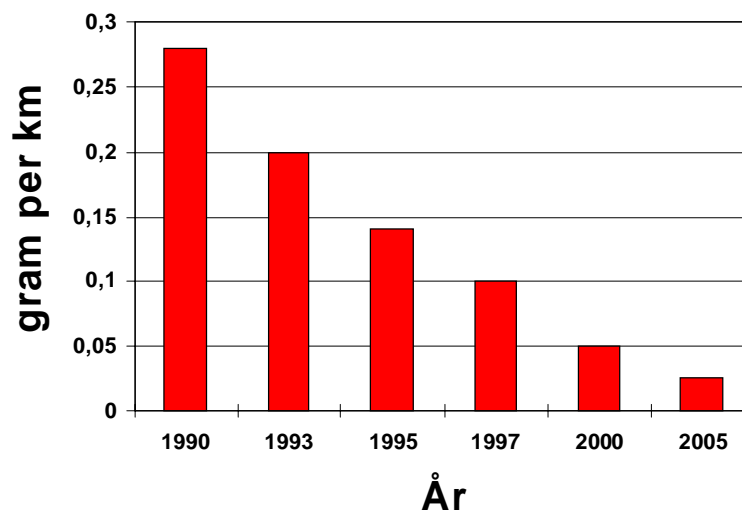
I 1992 igangsatte EU det såkaldte AUTO/OIL I program, der havde til formål at fastlægge normer for år 2000 for alle motorkøretøjskategorier, som skulle være opfyldt i 2010. Resultatet blev et forslag fra EU til en 2-trins proces. Man fastsatte bindende normer for 2000 (Euro 3) og for 2005 (Euro 4). For brændstoffer blev der dog for 2005 kun sat bindende normer for svovlindhold (benzin og diesel) og aromatindhold (benzin).

Euro 3

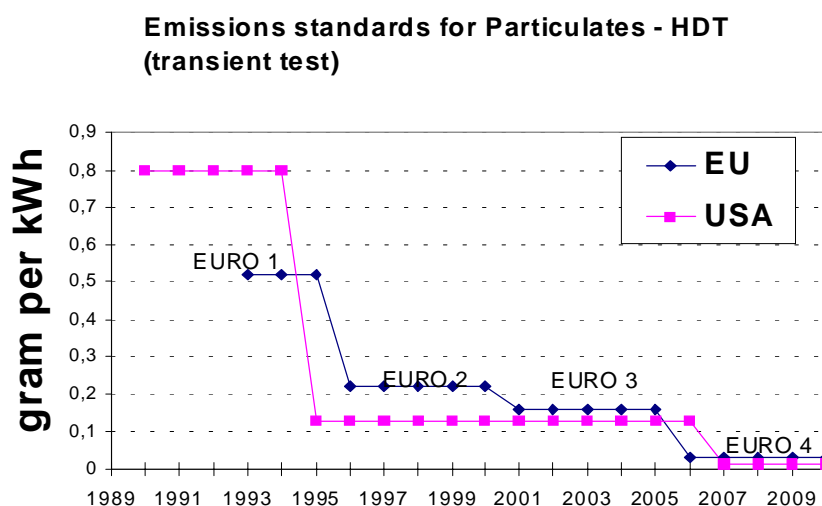
Euro 3 normerne indeholder også en skærpelse af testprocedurerne, som ligger nærmere normale kørselsforhold. Der indføres også regler, som er rettet mod køretøjer i brug. De omfatter f.eks. "On Board Diagnostic" (OBD) og mulighed for at kontrollere, at køretøjer i brug, der er anvendt og vedligeholdt efter fabrikantens forskrifter, opfylder kravene efter 80.000 km (100.000 km fra 2005). Reglerne indeholder mulighed for recall, såfremt der konstateres overskridelse af grænseværdierne.

Udvikling

I *Figur 13* og *Figur 14* er vist udviklingen for partikler for henholdsvis personbiler og tunge køretøjer.



Figur 13 EU -krav til personbilers maksimale emissioner af partikler. Kravene gælder for nye køretøjer.



Figur 14 Krav til tunge køretøjers maksimale emissioner af partikler i EU og USA. Kravene gælder for nye køretøjer.

Fremtidens krav

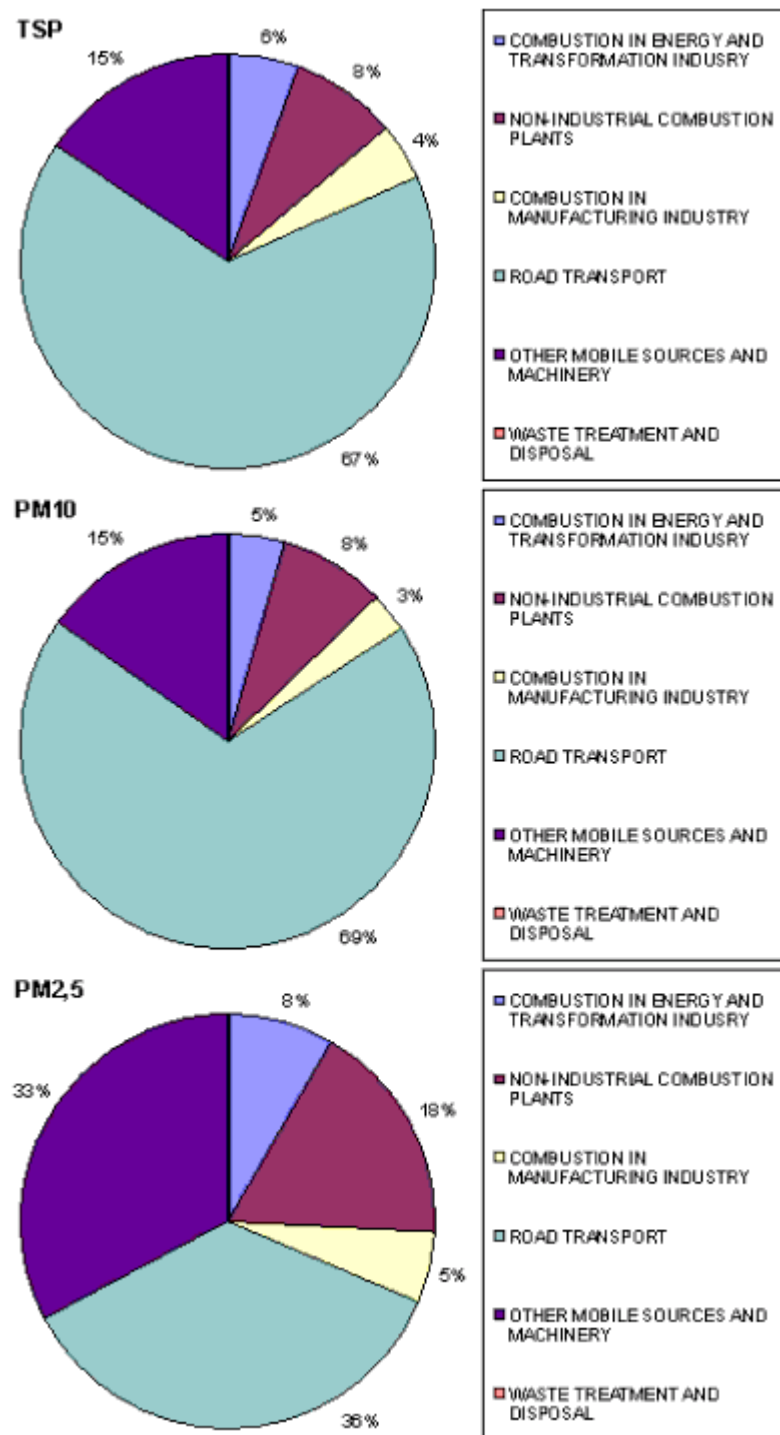
Det er i dag den almindelige opfattelse, at overholdelsen af de europæiske Euro 4-krav (2006) for partikler og Euro 5-krav (2008) for NO_x og de amerikanske 2007-krav for både NO_x og partikler vil forudsætte anvendelse af efterbehandlingsudstyr (NO_x -katalysatorer og partikelfiltre).

5 Danske emissioner

5.1 Nationale emissionsopgørelser for partikler

DMU gennemfører løbende opgørelser over danske emissioner af bl.a. partikler. Data findes på DMU's hjemmeside (DMU, emissioner, se referenceliste).

For partikler er der givet en oversigt i *Figur 15*. Oversigten er givet % af massen. Det ses heraf at vejtrafikken er den helt dominerende forureningskilde for partikler, både for TSP, PM_{10} og $PM_{2.5}$, selv om bidraget til $PM_{2.5}$ er relativt mindre end for de større partikler. Det skal understreges, at ultrafine partikler i princippet er inkluderet, men da de vægtmæssigt kun betyder lidt ses de stort set ikke i grafen. Der foretages ikke emissionsopgørelser for ultrafine partikler på grund af manglende data.



Figur 15 Relative partikelemissioner i Danmark fordelt på kildetyper. Figuren er kopi fra DMU's hjemmeside (DMU, emissioner).

Tabel 3 Danske partikel-emissioner for 2000 fordelt på hoved kildetyper (ref. DMU emissioner), hvor der også findes flere detaljer (Enhed: tons pr år).

	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}
Forbrænding ved energiproduktion	1588	1223	1009
Ikke-industrielle forbrændingsanlæg	2330	2245	2130
Forbrænding industriproduktion	1217	801	660
Vejtransport	18647	18647	4346
Andre mobile kilder og maskiner	4357	4153	3959
Affaldsbehandling og deponering	1	1	1
Total	28140	27070	12104

I *Tabel 3* er vist de danske emission opdelt i de klasser der leveres til CORINAIR (ref. DMU, emissioner)

Det skal understreges, at der ikke er en direkte sammenhæng mellem emissioner og luftkvalitet. Sidstnævnte bestemmes især af afstanden til kilderne, kildetyperne (høje/lave kilder) og spredningsforholdene (meteorologi, bebyggelse og topografi). Derfor er det vigtigt, at bestemme emissionernes fordeling med større rumlig opløsning (ned til gadeniveau), samt at udføre modelberegninger og konkrete målinger for at kunne vurdere de forskellige kilders betydning og dermed de nødvendige tiltag.

6 Partikelemissioner i København

Metode

I dette kapitel gives en sammenfatning af resultaterne af modelberegningerne og dataanalyse, som ligger til grund for bestemmelsen af trafikens bidrag til PM_{10} -forureningen for København. Beregningerne er foretaget i forbindelse med et projekt om vurdering af effekten af filtre på tunge køretøjer i Danmark (Palmgren et al, 2001a). Kapitlet er medtaget her for at illustrere, hvorledes denne type af vurderinger kan foretages. En samlet vurdering af partikelforureningen fra alle kilder i København vil kræve en langt større indsats end det er muligt indenfor de givne rammer.

Datagrundlag

Beregningerne er udført på følgende datagrundlag:

- kortlægning af trafikken i København foretaget af Vejdirektoratet i 1996 i forbindelse med et SMP-projekt om Forurening fra Trafikken i Byområder.
- beregnede emissioner af NO_x og PM_{10} fra trafikken i København ved anvendelsen af førnævnte trafikdata og emissionsfaktorer fra den Europæiske Emissionsmodel COPERT II. De anvendte emissionsfaktorer svarer til trafikens sammensætning i 1999-2000. For PM_{10} er der anvendt to alternative metoder, som er beskrevet i det følgende.
- målingerne af NO_x -koncentrationer fra landbaggrundsstationen i Lille Valby (LMP).
- meteorologiske data fra meteorologimasten på taget af H.C. Ørsted Instituttet i København (LMP).

Der foreligger endnu ikke en længere tidsserie af PM_{10} i bybaggrund i Danmark. Derfor en mere detaljeret datanalyse er foretaget på baggrund af målingerne i London og en landbaggrundsstation i Harwell (<http://www.aeat.co.uk/netcen/airqual/index.html>).

Koncentrationerne af NO_x og PM_{10} er beregnet med den såkaldte Urban Background Model (UBM)(Berkowicz, R. 1999).

6.1 Trafikemissioner i København

PM_{10} emissioner

Emissionen af PM_{10} er bestemt ved anvendelsen af to forskellige metoder. Den første metode er baseret på den samme fremgangsmåde, som er anvendt i forbindelse med bestemmelsen de nationale emissioner, og som er beskrevet i (DMU, emissioner). Den anden metode tager udgangspunkt i NO_x -emissionerne *Figur 16* og relationen mellem PM_{10} og NO_x emissionsfaktorer for de fire hovedkategorier af køretøjer, som er udregnet på basis af data fra UK Emissions Database (<http://www.rsk.co.uk/ukefd/roads.htm>). Disse værdier er vist i *Tabel 4*. PM_{10}/NO_x forholdet beregnet ved hjælp af faktorerne stemmer godt overens med målingerne af NO_x og PM_{10} koncentrationer i

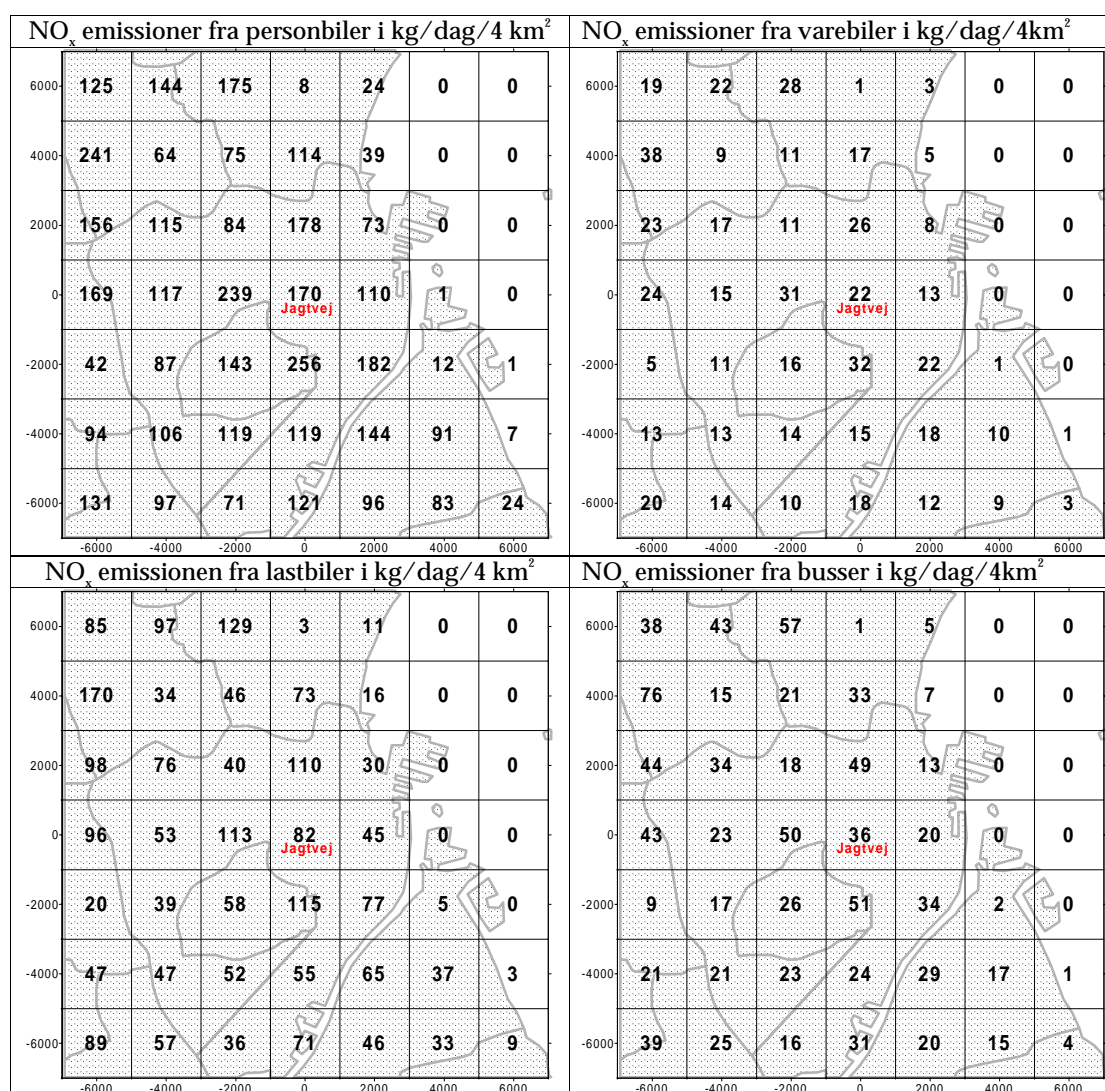
Jagtvej. Hvorfor den nationale opgørelse resulterer i forholdet, som er omtrent halv så stort, er uklart.

Trafikkens NO_x emissioner

Tabel 4 Forholdet mellem PM₁₀/NO_x emissionsfaktorer bestemt ud fra UK Emissions Database.

Køretøjskategori	PM ₁₀ /NO _x forhold (g/g)
Personbiler	0,03
Varebiler	0,28
Lastbiler	0,10
Busser	0,06

Trafikkens NO_x emissioner i København, fordelt på et 2 x 2 km² gitternet, er vist i Figur 16. Emissionerne er opdelt i de fire hovedkategorier, dvs. personbiler, varebiler, lastbiler og busser. Samtlige data præsenteret i dette kapitel refererer til hverdagsdøgn.



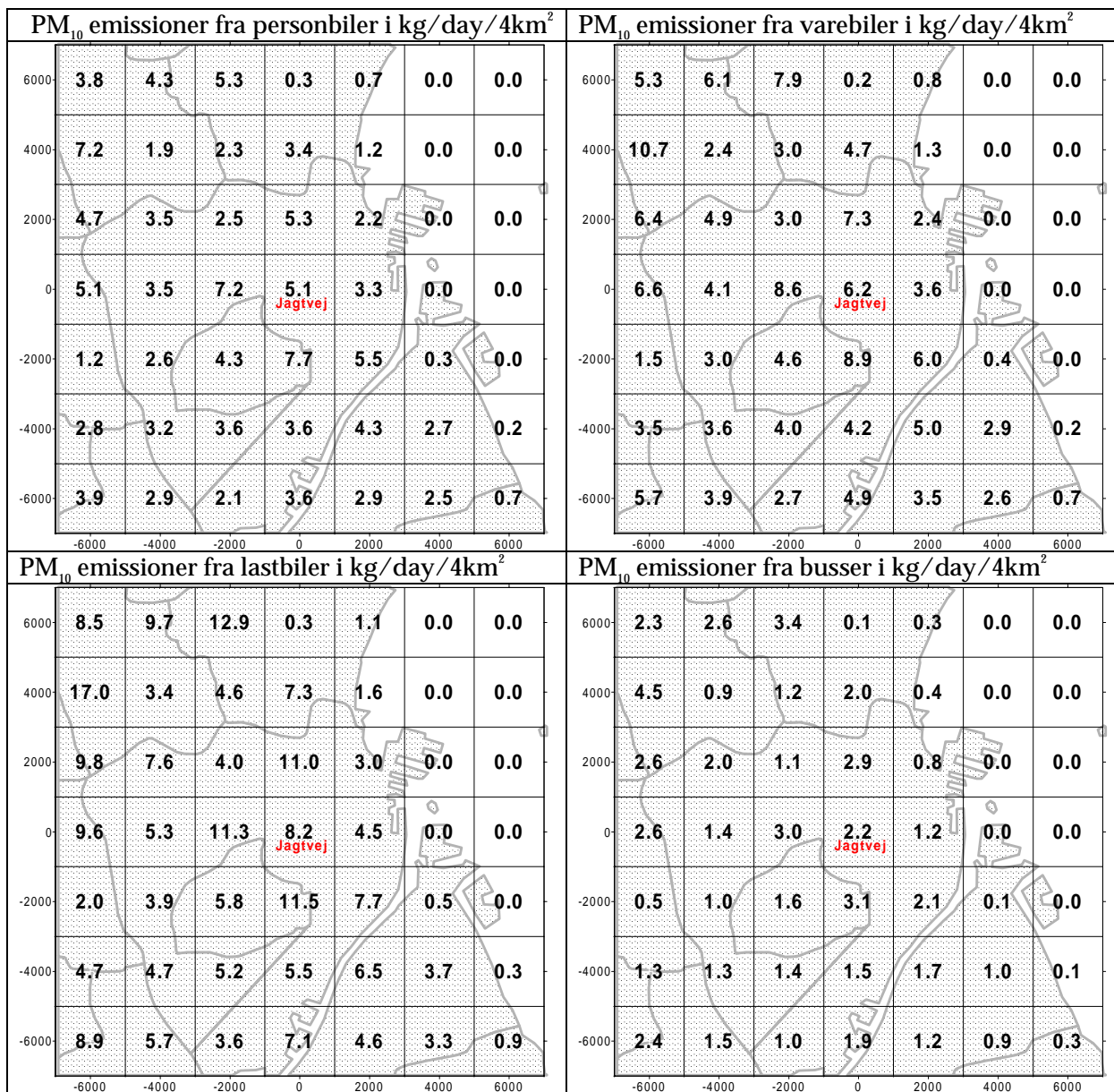
Figur 16 Trafikkens NO_x emissioner i København.

Det ses af figuren, at det dominerende bidrag til NO_x emissionerne stammer fra personbiltrafikken. Den relative andel af personbiltrafikken er størst i byens centrum, og er noget mindre i byens udkant, hvor emissionen fra lastbiltrafikken på de store motorveje derimod er størst.

NO_x emissionerne fra *Figur 16* samt de meteorologiske data fra HCØ-masten er anvendt som input til spredningsmodellen UBM, og de resulterende NO_x koncentrationer for hele året 1999 er beregnet time for time. Disse beregninger er sammenholdt med de målte koncentrationer fra LMP målestationen på taget af HCØ i det følgende afsnit.

Trafikkens PM_{10} emissioner

Trafikkens PM_{10} emissioner i København, med opdeling på de fire køretøjskategorier, er vist i *Tabel 5*. Det ses, at det største bidrag hidrører fra lastbiltrafikken. Dette er i modsætning til den nationale opgørelse (DMU, emissioner), som viser, at mere end 50% af PM_{10} emissionen i byområder kan tilskrives varebiler. Ifølge den foreliggende opgørelse, er bidraget fra varebiler omtrent lige så stort, som fra personbiler. Desuden bør der bemærkes, at PM_{10} emissionen fra personbiler tilsyneladende er noget undervurderet her, da der ikke er taget hensyn til at ca. 8% af personbiler er dieseldrevne, og derfor har større partikelemissioner end de benzindrevne biler. Den totale PM_{10} -emission i København, fordelt på de fire køretøjskategorier, er vist i *Tabel 5*. Det angivne døgn gennemsnit refererer til et hverdagsdøgn, men ikke juli måned, hvor trafikken er væsentlig mindre. Fordelingen i København er vist på *Figur 17*.



Figur 17 Trafikkens PM₁₀ emissioner i København.

Tabel 5 Døgngennemsnit PM₁₀- emission i København.

Køretøjer	PM10 emission (kg/døgn)	%
Personbiler	133,5	22,2
Varebiler	167,6	27,9
Lastbiler	236,7	39,4
Busser	63,2	10,5
I alt	601,1	100

6.2 Trafikkens bidrag til PM₁₀ koncentrationer i bybaggrund

PM₁₀ koncentration

Resultaterne af de beregnede bidrag til årsgennemsnit af PM₁₀ koncentrationer i København, fordelt på de 4 køretøjskategorier er vist i *Tabel 6*. Beregningsresultater er vist kun for LMP-målestationen på H.C.Ørstedssintitutet (bybaggrund). Lidt højere værdier forekommer i udkanten af byen, hvor tungtrafik andelen er større. De foreliggende koncentrationer skal ses i sammenhæng med den målte landbaggrund på 22 µg/m³. En del af denne baggrund må formodes ligeledes at stamme fra trafikken, men det foreliggende datagrundlag er utilstrækkeligt til at kunne foretage en kvalificeret vurdering.

Usikkerhed

Tabel 6 De beregnede bidrag til årsgennemsnit af PM₁₀- koncentrationer i København fra trafikken i byen

Køretøjer	PM ₁₀ (µg/m ³)	%
Personbiler	0,24	24,64
Varebiler	0,28	28,18
Lastbiler	0,36	36,51
Busser	0,10	10,66
I alt	0,98	100

Da de beregnede PM₁₀ koncentrationer er fremkommet ved en omregning af NO_x emissionerne til PM₁₀ emissioner, er pålideligheden af disse beregninger stærkt afhængig af pålideligheden af NO_x beregninger og de antagelser der er gjort vedrørende forholdet mellem emissioner for disse to komponenter. En vis undervurdering af NO_x koncentrationer i modellen peger i retning af, at også PM₁₀ koncentrationer kan være lidt undervurderet. Manglende måledata gør det imidlertid umuligt at foretage en mere detaljeret vurdering, men usikkerheden formodes ikke at være større end ca. 50%.

6.3 Trafikkens bidrag til partikelforureningen i gaderum

I smalle gader med stærk trafik er forureningen med bl.a. partikler væsentlig større og trafikens bidrag er betydelig. Trafikkens bidrag til partikelforureningen i gaderum kan beregnes med DMU's gadeluftmodel, OSPM (Berkowicz, R. 2000), hvis der foreligger gode emissionsfaktorer for alle trafikens bidrag, d.v.s. udstødning, vejstøv, dæk, bremses, m.v. Disse emissionsfaktorer er dog for usikre endnu, derfor er det i kapitel 6 vurderet på grundlag af målinger.

7 Analyse af luftkvalitetsdata fra København

Miljøkontrollen har bedt DMU om at foretage en analyse af specielt de data om partikler, der indsamlet siden 2001 på H.C. Andersens Boulevard i København, med henblik på at få en oversigt over situationen i København. Nærværende er en foreløbig analyse af de igangværende målinger. En mere fuldstændig analyse kan gennemføres, når der foreligger flere data.

7.1 Oversigt over de foreliggende data

Måleprogrammer

Til støtte for analysen findes næsten ubrudte måleserier for gasser, begyndende marts-april 2001, af halvtimemiddelværdier af CO (kulilte), NO (nitrogenmonoxid) og NO_x (summen af nitrogenmonoxid og nitrogendioxid). Partikler er blevet målt i kampagner siden slutningen af juli 2001, dels med TEOM-monitor (PM₁₀), dels med SMPS (antalsmæssige partikelfordelinger i størrelsesintervallet 6 nm - 700 nm). Siden midten af maj 2002 er der desuden målt PM_{2,5}, ligeledes med TEOM-monitor. Vedrørende metoder, se afsnit 2.2. Disse målinger er ligeledes foretaget på halvtimebasis, så de umiddelbart kan sammenstilles med målingerne af gasserne. DMU har desuden i samarbejde med Miljøkontrollen foretaget målinger (timemiddelværdier) af EC ('elemental carbon' eller sod) med ACPM-monitor i en 4-5 måneder lang kampagne i efteråret 2001.

Oversigt over resultater

I *Figur 18* og *Figur 19* ses en oversigt over alle de foreliggende målinger siden 1. juli 2001, idet der for SMPS-målingerne dog kun er medtaget de integrerede værdier af partikelkoncentrationen ('Partikler') og volumenkoncentrationen ('Volumen'). De hertil svarende middelværdier, medianer og percentiler i vist i *Tabel 7*. Udover disse data findes der i databasen værdier for 29 størrelsesklasser, samt for den integrerede partikeloverflade. De manglende PM₁₀ bl.a. i første kvartal af 2002 skyldes tekniske vanskeligheder med TEOM-monitoren. De manglende SMPS-data skyldes først og fremmest, at SMPS-udstyret i længere perioder har været anvendt til inde/ude-målinger i en lejlighed på Jagtvej (afsnit 0). Til trods for dette er der tale om et meget stort datamateriale, idet der er målt mere end 80.000 enkelt-spektre i løbet af måleperioden.

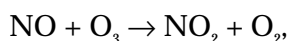
Tabel 7 Middelværdier, medianer og percentiler af timemålinger for perioden juli 2001 - juli 2002 på H.C Andersens Boulevard.

	PM ₁₀ ⁷⁾	PM _{2,5}	CO	NO	NO _x	NO ₂ ⁹⁾	Partikler	Volumen	EC
Enhed	µgm ⁻³	µgm ⁻³	ppm	ppb	ppb	ppb/µgm ⁻³	cm ⁻³	µm ³ cm ⁻³	µgm ⁻³
Middelværdi	35,8	15,3	0,78	57,3	87,4	30,1/57,7	40389	16,0	2,7
Median	30,5	14,0	0,67	45,1	75,5	29,3/56,2	31710	12,8	2,3
98%-percentil	102,0	33,8	2,18	186,2	234,3	58,2/111,6	130462	46,3	7,1
19. højeste						71,3/136,7			

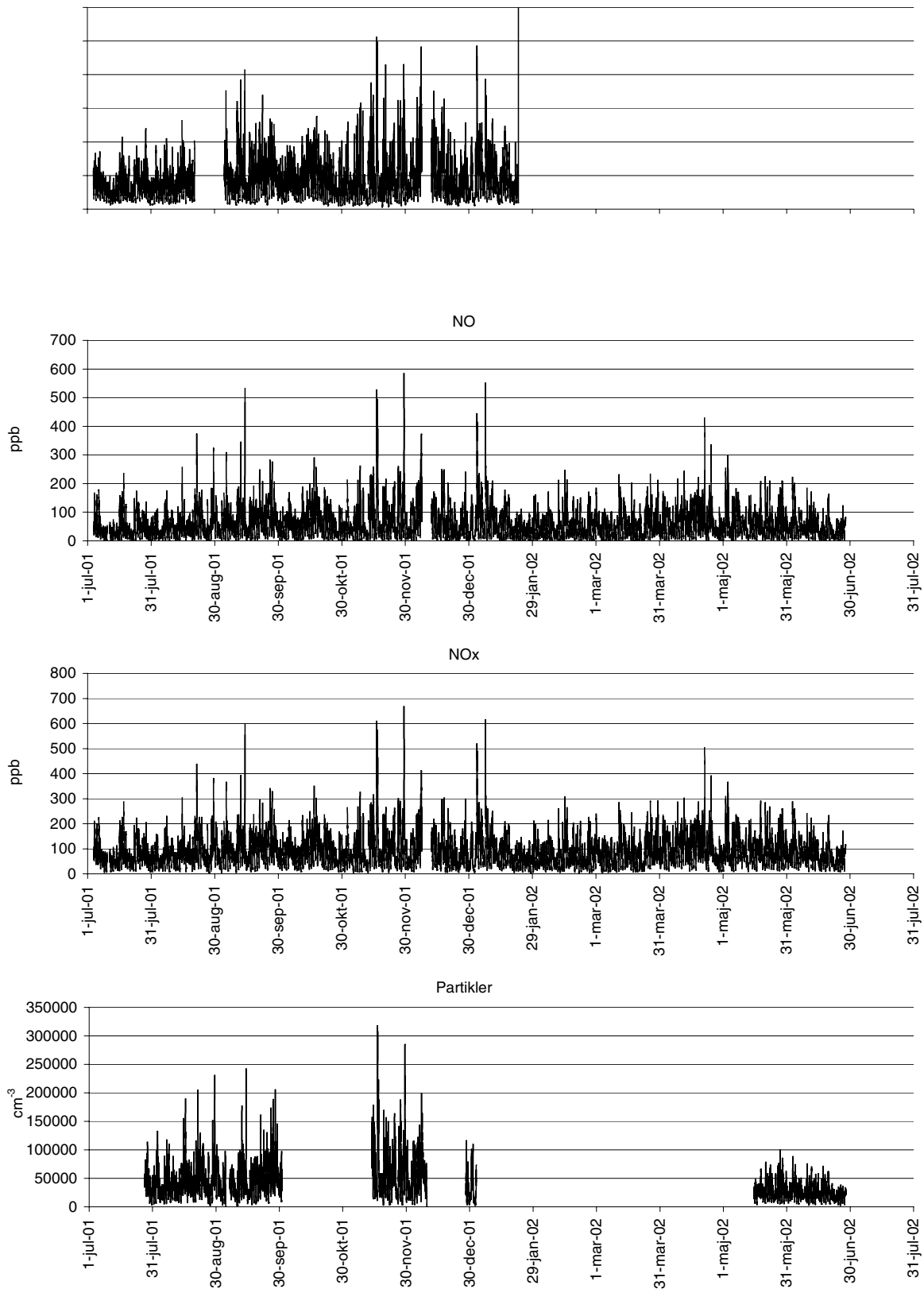
De angivne målinger af PM₁₀ kan ikke umiddelbart sammenlignes med de eksisterende grænseværdier (se diskussion senere). Grænseværdierne for NO₂ er 40 µgm⁻³ (årsmiddelværdi), samt 18 årlige overskridelser af 200 µgm⁻³ (skæringsdata 2010).

Ugevariation

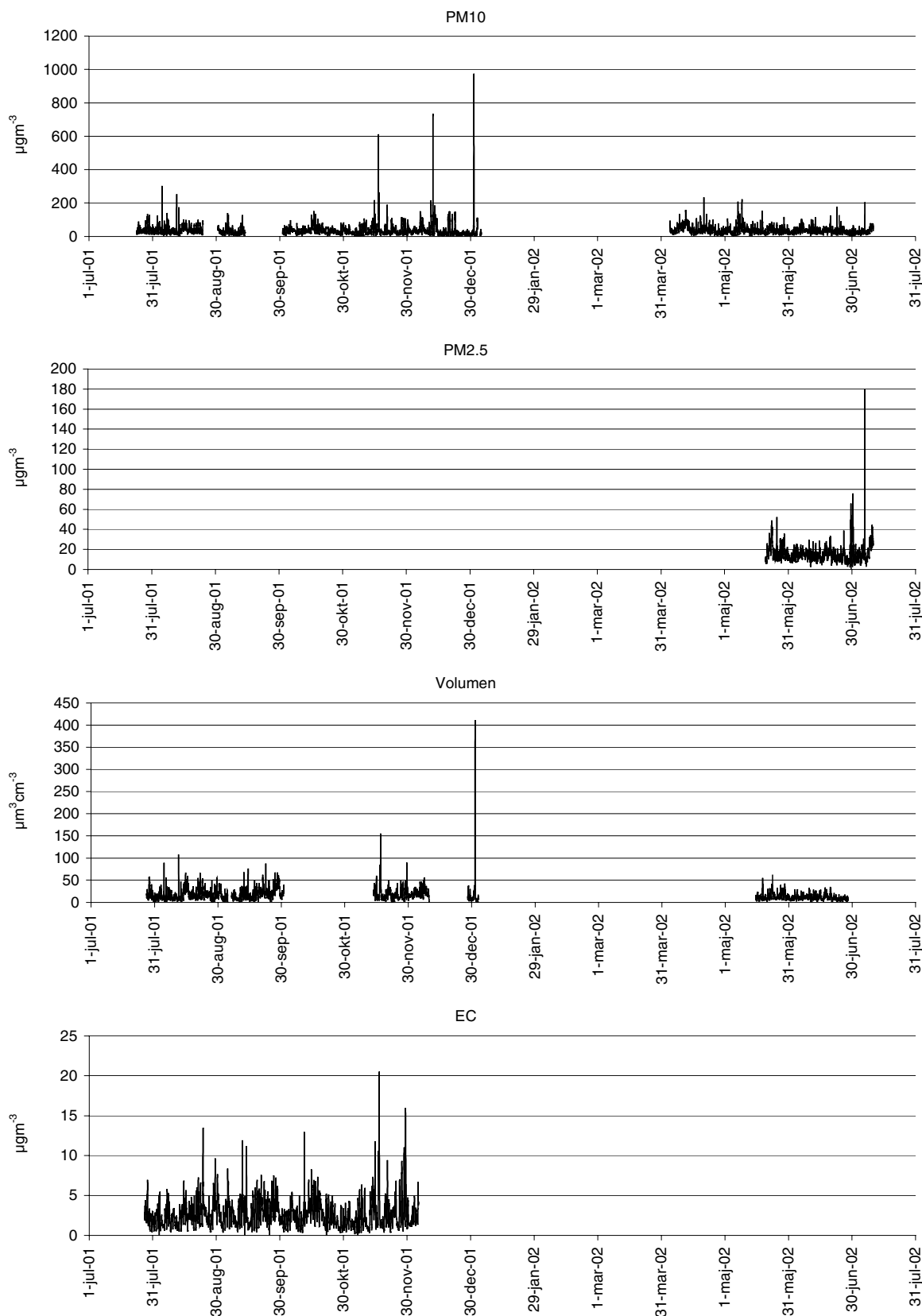
Alle målingerne udviser en markant døgn- og ugevariation i takt med trafikken. Døgnvariationen kan ikke umiddelbart ses af *Figur 18* og *Figur 19*, fordi målepunkterne ligger for tæt. For mere tydeligt at demonstrere samvariationen med trafikken, er der i *Figur 20* og *Figur 21* time for time udregnet værdier for en middelluge fra de perioder, hvor der foreligger samtidige målinger af gasser, PM₁₀, EC og partikelantal. NO₂ (NO_x minus NO) er vist i stedet for NO. Det ses, at samvariationen er dårligst for PM₁₀, partikelvolumen og NO₂. For PM₁₀ og partikelvolumen er årsagen til dette, at der findes betydelige kilder, som varierer uafhængigt af trafikken (fjerntransporterede partikler). Det skal bemærkes, at samvariationen af PM₁₀ med trafikken dog er langt bedre målt med TEOM, end når den måles med den akkrediterede metode, der anvendes på en lang række af ATMI's målestationer. Dette skyldes den høje arbejdstemperatur i TEOM'en (50°C), der medfører, at en stor del af den fjerntransporterede partikelmasse fordampes (ca. 50% svarende til i gennemsnit 11 µgm⁻³). For NO₂ er årsagen til den dårligere samvariation, at kun en lille del emitteres direkte fra trafikken. Den største del dannes ud fra NO ved reaktion med fjerntransporteret O₃ (ozon),



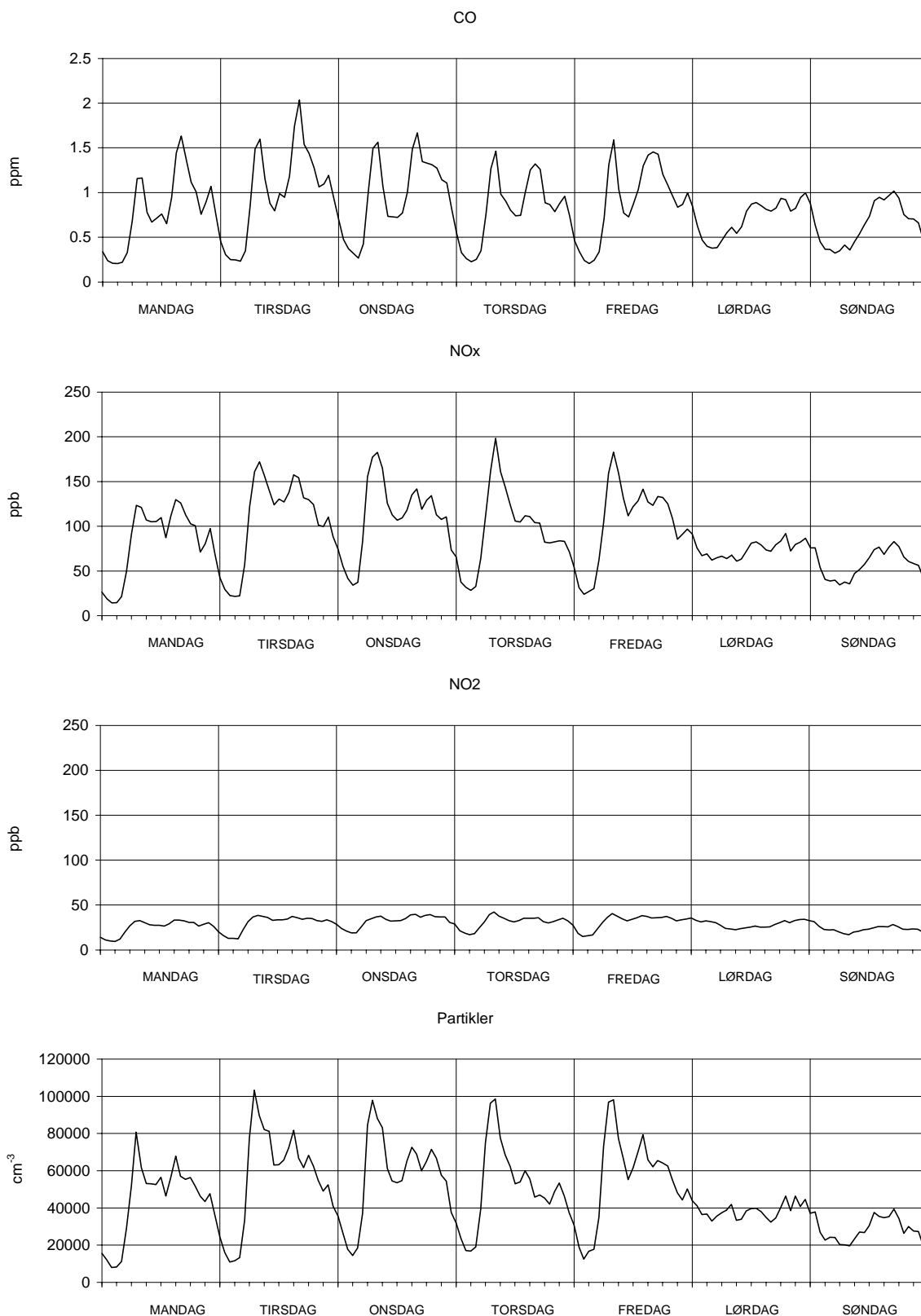
men denne omdannelse begrænses af, at ozonen kun er tilstede i mindre mængder. I den pågældende gennemsnitsuge blev der målt 25 ppb O₃ i gennemsnit ved landstationen Lille Valby uden for København.



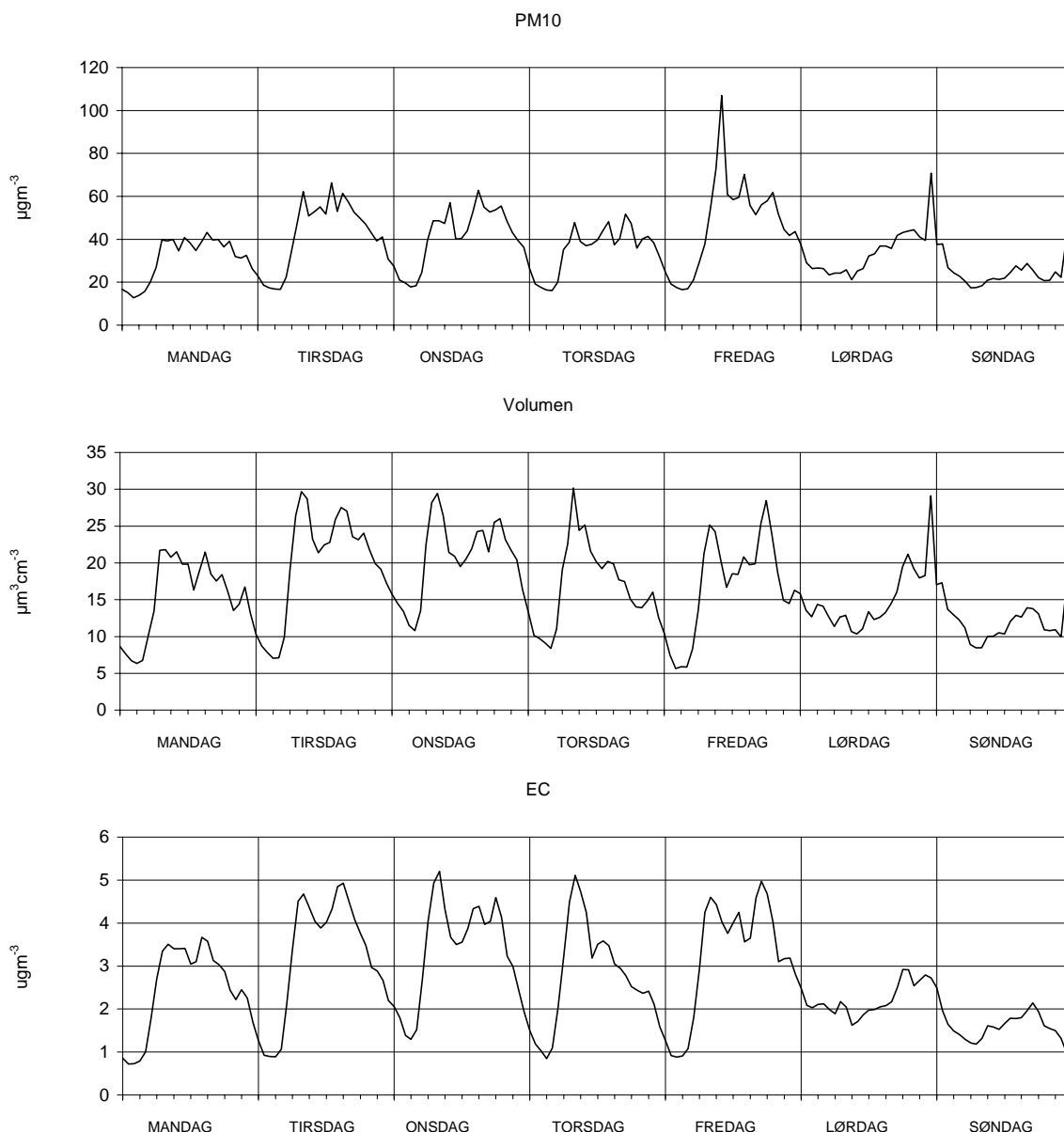
Figur 18 Målingerne i perioden 1. juli 2001 til 1. juli 2002 på H.C. Andersens Boulevard af gasser og partikelantal.



Figur 19 De foreliggende målinger i perioden 1. juli 2001 til 1. juli 2002 på H.C. Andersens Boulevard af PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, partikelvolumen og EC (sod).



Figur 20 Variationen - på H.C. Andersens Boulevard - af gasser og partikler (enhed: antal pr. cm³) i løbet af en middeluge. Variationen skyldes indflydelsen fra trafikken og fra de meteorologiske forhold (fortynding). Dannelse af NO₂ ud fra NO er begrænset af koncentrationen af fjerntransporteret ozon.



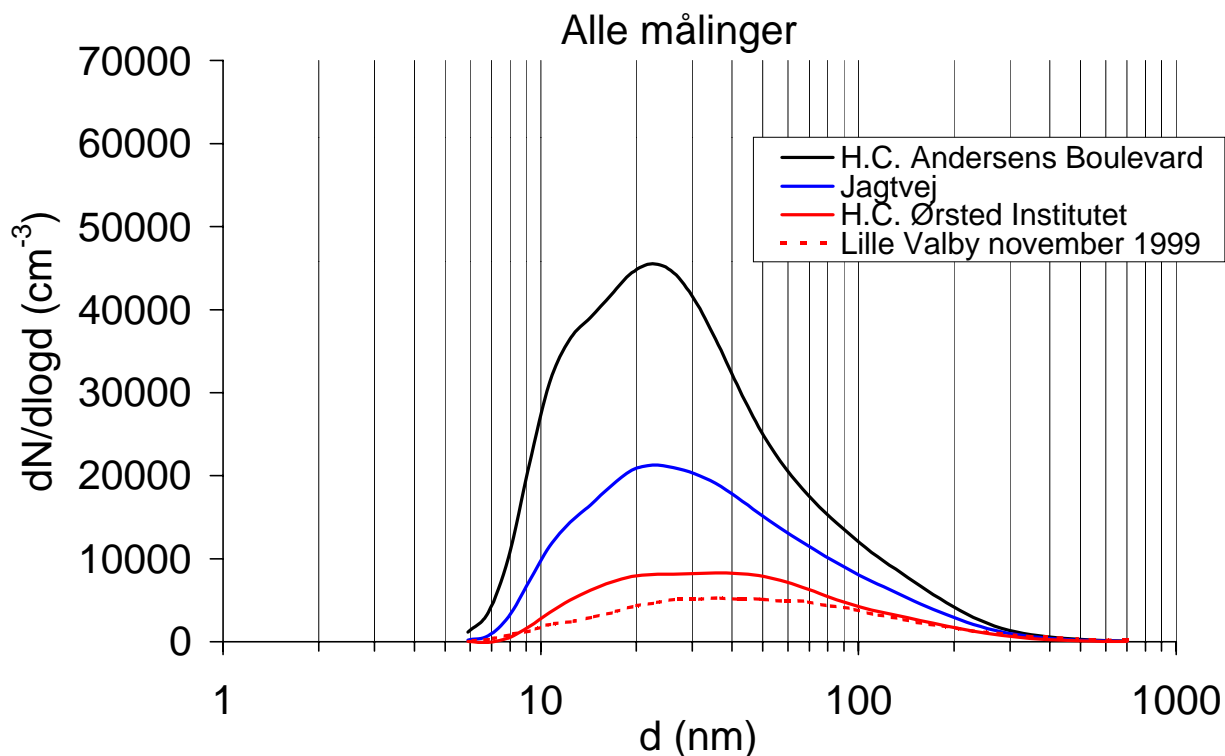
Figur 21 Variationen - på H.C. Andersens Boulevard - af PM_{10} , partikelvolumen (enhed: μm^3 pr. cm^3), samt EC (sod) i løbet af en middelluge. Variationen skyldes især indflydelsen fra trafikken og fra de meteorologiske forhold (fortynding). For PM_{10} og partikelvolumen er der også væsentlige bidrag fra andre kilder. Udover fjerntransport ses en indflydelse fra Tivolis fyrværkeri.

7.2 Ultrafine partikler

De ultrafine partikler stammer især fra trafikken

De ultrafine partikler (diameter $< 0.1 \mu\text{m}$) på en trafikeret gade som H.C. Andersen Boulevard stammer først og fremmest fra trafikken. Dette kan tydeligt ses ved en sammenligning med tilsvarende målinger af ultrafine partikler foretaget på Jagtvej, på taget af H.C. Ørsted Institutet (bybaggrund), samt i Lille Valby ved Risø vest for København (landbaggrund). I Figur 22 er vist gennemsnitlige partikelfordelinger fra H.C. Andersens Boulevard og fra de to andre stationer i København beregnet på grundlag af samtidige målinger i perioden juli-september 2001. Til sammenligningen foreligger der desværre ikke samtidige målinger fra baggrundsstationen Lille Valby udenfor København. Den viste partikelfordeling i Figur 22 stammer fra en kort

måleperiode (5 dage) i november 1999. Det fremgår af figuren, at koncentrationen af de ultrafine partikler på H.C. Andersens Boulevard er langt højere end i Lille Valby, hvor trafikens indflydelse er lille. I forhold til Jagtvej er koncentrationen omtrent dobbelt så høj på H.C. Andersens Boulevard. Dette svarer godt til, at gennemsnitskoncentrationen af NO_x , der næsten udelukkende skyldes trafikens emissioner, også er væsentlig højere på H.C. Andersens Boulevard (ca. 1,8 gange højere) end på Jagtvej. Koncentrationen på H.C. Ørsted Institutet er kun moderat forhøjet i forhold til Lille Valby, hvilket stemmer med, at NO_x -koncentrationen i bybaggrund er langt mindre end på en trafikeret gade (på H.C. Ørstedinstitutet ca. 6 gange mindre end på Jagtvej).



Figur 22 Gennemsnitlige partikelfordelinger fra en række stationer i København beregnet på grundlag af samtidige målinger i perioden juli-september 2001. Til sammenligningen foreligger der desværre ikke samtidige målinger fra baggrundsstationen Lille Valby udenfor København. Den viste partikelfordeling (stiplet) stammer fra en kort måleperiode (5 dage) i november 1999. Vedrørende størrelsen $dN/d\log d$, se forklaring i afsnit 2.3.

'Modes' i størrelsesfordelingerne

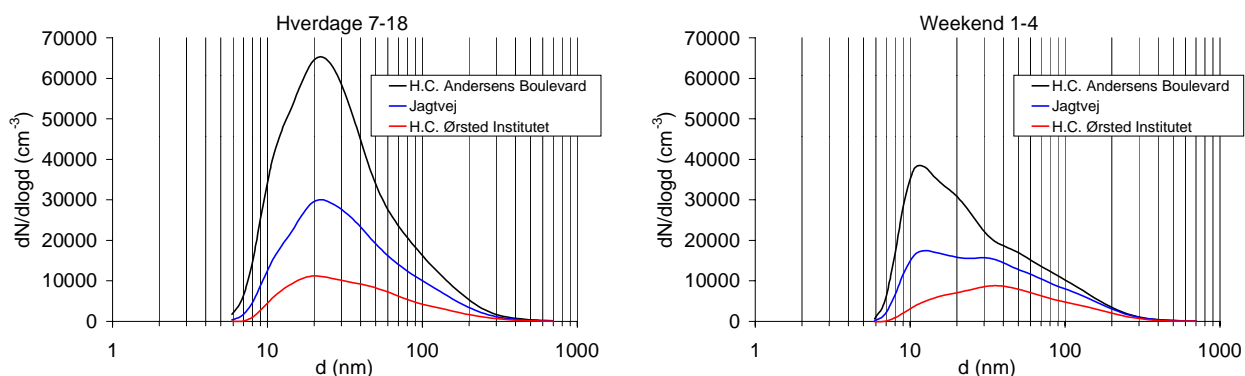
Figur 22 viser også, at størrelsesfordelingerne indeholder mindst 3 forskellige modes (lat. modus/modi), dvs. gaussiske (eller klokkeformede) fordelinger. Længst til venstre ses den første mode som en lille 'bule' ved 12 nm. Det er tidligere påvist (Wählén et al., 2001b), at denne mode med stor sandsynlighed skyldes dieselbrændstoffets indhold af svovl, idet den før nedsættelse fra ca. 500 ppm til ca. 50 ppm i juli 1999 var meget mere fremtrædende (se afsnit 2.3). Ved 24 nm ses den mest dominerende mode, som skyldes uforbrændte kulbrinter og andre flygtige forbindelser, der kondenserer i eller efter udstødningssystemet. Længst til højre ses den tredje mode ved 50-100 nm med en hale ind i det fine partikelområde (> 100 nm). Denne mode skyldes sodpartikler, der især dannes i dieselmotorer. Denne mode er dominerende, hvis man betragter massen af partiklerne i stedet

for antallet. Partikelstørrelsen er mere eller mindre sammenfaldende med størrelsen af de fjerntransporterede sekundære partikler, der dannes ved omdannelse i atmosfæren af gasformig luftforurening (især til ammoniumsulfat og ammoniumnitrat). De sekundære partikler vil dominere uden for byerne, og ses derfor tydeligst i partikelspektret fra Lille Valby.

7.3 Analyse af samvariationen

Forurening fra trafikken

Ved at sammenligne de gennemsnitlige ugevariationer - på H.C. Andersens Boulevard - af NO_x , CO, EC, det integrerede partikelantal (N) og det integrerede partikelvolumen (V) i *Figur 20* og *Figur 21* ses det umiddelbart, at der er stor overensstemmelse mellem alle bortset fra CO, som har en døgnvariation, der er meget mere markant præget af morgen- og eftermiddagsmyldretiderne. Dette kan fortolkes således, at benzinbilerne, som emitterer størstedelen af CO, giver et ubetydeligt bidrag til både NO_x , EC og partikler. En statistisk (en såkaldt principal komponent) analyse af de indbyrdes korrelationer efter samme princip, som tidligere er brugt for Jagtvej (Wählin et al., 2001a), har bekræftet dette, men har samtidig givet indicier for, at der kan skelnes mellem to forskellige typer dieseltrafik, hvilket ikke var muligt for Jagtvej.

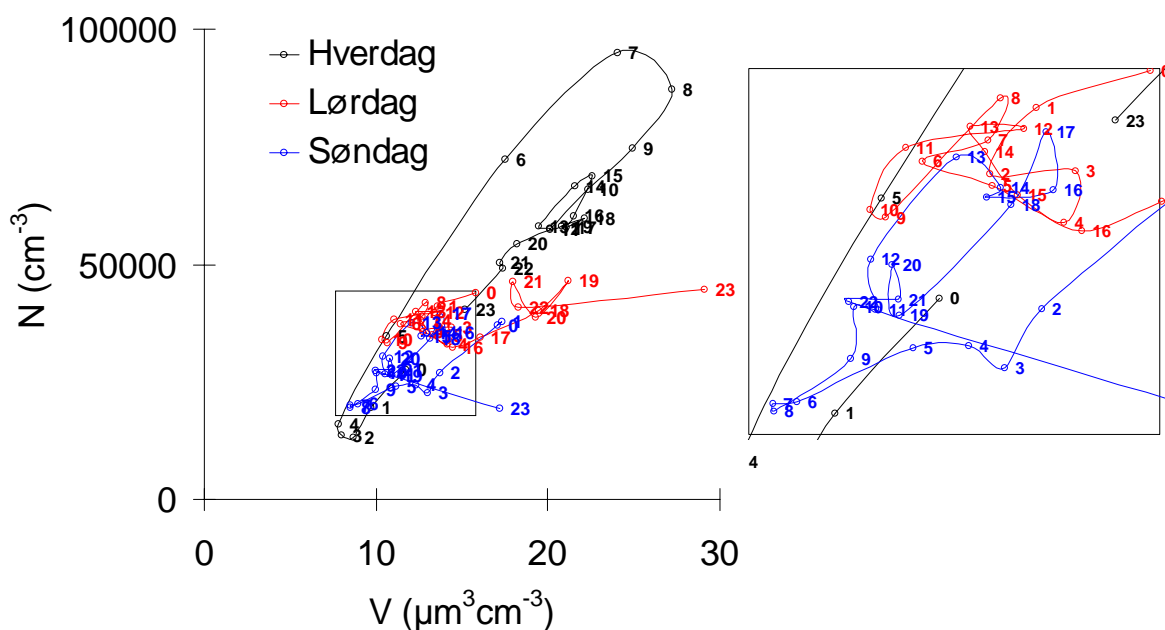


Figur 23 Sammenligning af partikelfordelingerne på hverdage i dagtimerne og i weekenderne i de sene nattetimer, hvor trafikken med dieseltaxier er særligt fremtrædende. Det ses tydeligt, at taxierne emitterer langt færre partikler i størrelsesområdet omkring 25 nm end køretøjerne, der dominerer trafikken om dagen.

Resultater af analysen

Det vil føre for vidt at gennemgå selve analysen i denne rapport, men det er muligt at påvise eksistensen af de to dieselkilder på en mere simpel måde. Dette ses i *Figur 23*, der viser en sammenligning af partikelfordelingerne på hverdage i dagtimerne og i weekenderne i de sene nattetimer, hvor trafikken med dieseltaxier er særligt fremtrædende. Det ses tydeligt, at taxierne emitterer langt færre partikler i størrelsesområdet omkring 24 nm end køretøjerne, der dominerer trafikken om dagen. En anden type analyse er vist i *Figur 24*, hvor det gennemsnitlige antal af partikler (N) er vist time for time som funktion af det gennemsnitlige rumfang af partikler (V) på hverdage, lørdage og søndage. Antallet af partikler er stærkt påvirket af kondensationspartiklerne ved 24 nm, mens denne mode kun har ringe betydning, når man betragter partikelvolumen, der er langt stærkere afhængig af antallet af de noget større sodpartikler. Punkterne er

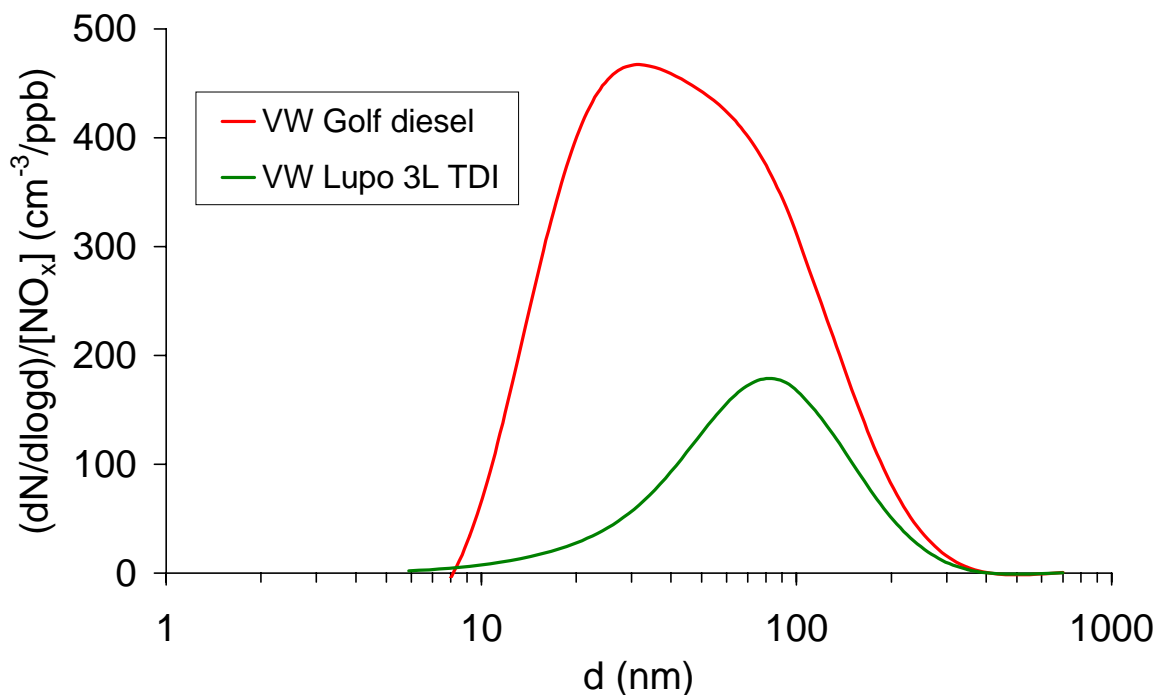
markeret med klokkeslættet for hver påbegyndt time og er forbundet med linier således, at en døgncyklus kan følges. Det ses, at N/V-forholdet (antal/volumen-forholdet) er stort tidligt om morgenen på hverdage, hvor den almindelige dieseltrafik dominerer (varekørsel, renovation, busser, m.m.), mens forholdet er lille sent natten efter fredag og hele natten mellem lørdag og søndag, hvor der er megen taxitrafik.



Figur 24 Den gennemsnitlige (N,V)-døgncyklus for partikler på hverdage, lørdage og søndage (N = antalskoncentration, V = rumfangskoncentration). Tallene angiver klokkeslættet for hver påbegyndt time. Det ses, at N/V-forholdet er stort tidligt om morgenen på hverdage, hvor den almindelige dieseltrafik dominerer (varekørsel, renovation, busser, m.m.), mens forholdet er lille sent natten efter fredag og hele natten mellem lørdag og søndag, hvor der er megen taxitrafik. Figuren til højre viser detaljerne i det indrammede område i ca. tre ganges forstørrelse.

To typer dieselkøretøjer

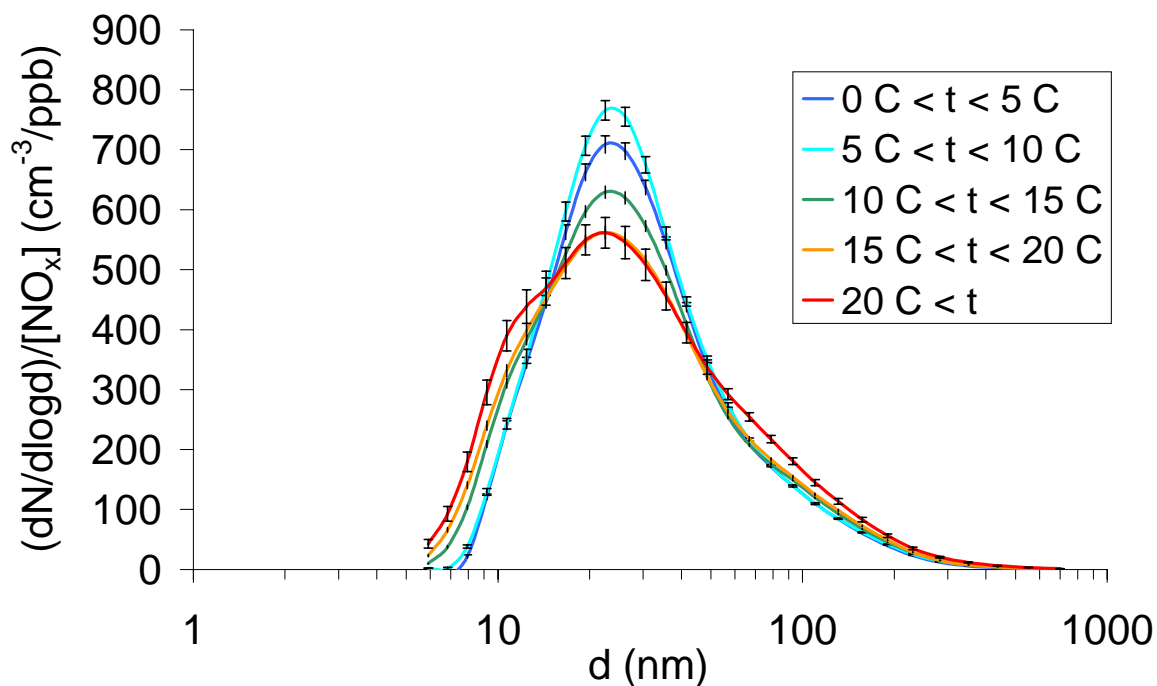
Dette viser, at der kan skelnes mellem to dieselkategorier, hvor den ene er almindelig dieseltrafik (formodentlig også med et mindre bidrag fra benzintrafikken), og den anden er taxitrafik, der emissionsmæssigt adskiller sig ved, at taxierne oftest er moderne dieselpersonbiler, der alle er monteret med oxiderende katalysator. Katalysatoren forbrænder de flygtige og halvflygtige forbindelser ('diesellugten'), hvoraf de halvflygtige er en vigtig kilde til dannelse af partikler ved kondensation i det ultrafine størrelsesområde. Et eksempel på forskellen mellem målte partikelfordelinger (i forhold til NO_x) for to tilfældigt udvalgte dieselmotorer med og uden oxiderende katalysator (VW Lupo og VW Golf) er vist i Figur 25. Det ses af figuren, at en partikeltop ved 100 nm dominerer i Lupo's emissionspektrum. Dette er en typisk størrelse af dieselemittede sodpartikler. For Golf'en, som ikke har oxiderende katalysator, ses foruden sodtoppen en meget markant top ved ca. 25 nm, der skyldes partikeldråber dannet ved kondensation af ufuldstændigt forbrændte kulbrinter og lignende.



Figur 25 Emissionsprofiler (partikler i forhold til NO_x) for en ældre dieselbil (VW Golf diesel) og en nyere (VW Lupo 3L TDI med oxiderende katalysator) målt på dynamometer under en transient kørecyklus, der efterligner det typiske hastighedsmønster på Jagtvej i København. Målingerne er foretaget i et samarbejde mellem DMU og Teknologisk Institut i Århus.

Temperaturafhængighed

Emissionsprofiler, der svarer til dem for bilerne (partikler i forhold til NO_x), er beregnet for trafikken på H.C. Andersens Boulevard (se Figur 26). Beregningen er foretaget i forskellige temperaturintervaller ved regressionsanalyse af de målte partikel- og NO_x-data, hvor NO_x bruges som markør for den generelle trafik. Det ses, at størrelsesfordelingens facon er afhængig af temperaturen. Forskellene kan skyldes, at der i højere grad dannes partikler ved kondensation, når udeluften er kold.

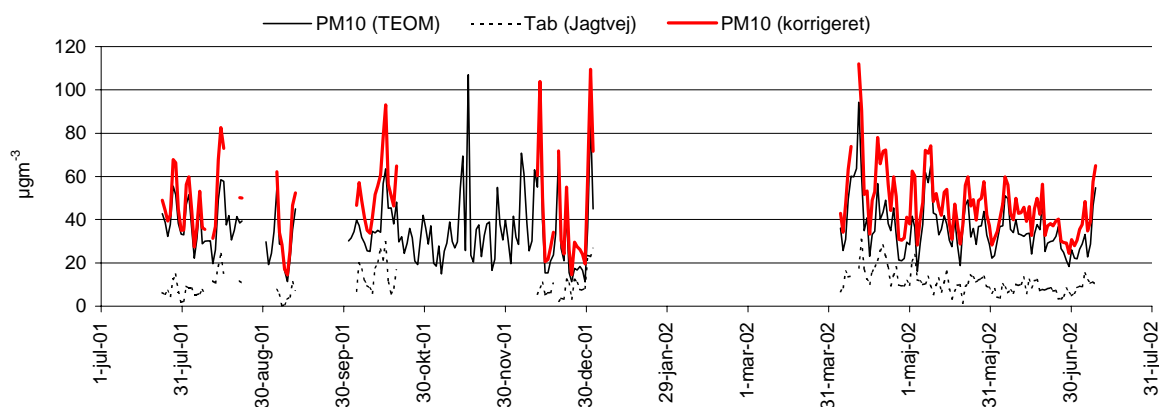


Figur 26 Forholdet mellem partikelkoncentration (som funktion af partikelstørrelse) og NO_x -koncentration på H.C. Andersens Boulevard. Analysen er foretaget ved regressionsanalyse på grupper af data sorteret efter temperaturen. (Temperaturen er målt på H.C. Ørsted Institutets tag).

7.4 Analyse af PM_{10} data og sammenligning med grænseværdierne

To metoder til PM_{10}

Grænseværdierne for PM_{10} gælder for døgnmiddelværdier. Hvis der som i dette tilfælde måles med en metode, der ikke er i overensstemmelse med EU-referencemetoden for måling med PM_{10} , skal der så vidt det er muligt korrigeres for dette. Ved DMU's målestationer på Jagtvej og på H.C. Ørsted Institutet's tag måles der PM_{10} både med TEOM-monitor og SM200-monitor. SM200-monitoren har opnået akkreditering hos DANAK, idet der ved målinger i Berlin er påvist en tilfredsstillende overensstemmelse med referencemetoden. En sammenligning af døgnmiddelværdier har vist, at TEOM-monitoren undervurderer PM_{10} i forhold til SM200-monitoren. Afvigelserne er stort set ens for begge målestationer, når samtidige målinger sammenlignes. Da trafikens bidrag til PM_{10} er langt større på Jagtvej end på H.C. Ørsted Institutet (ca. 6 gange), kan man derfor regne med, at TEOM måler trafikens bidrag korrekt, og at forskellen alene skyldes tab af fjerntransporteret eller regionalt PM_{10} . Tabet på H.C. Andersens Boulevard må følgelig forventes at være omtrent det samme som på Jagtvej, og der kan derfor foretages en korrektion i de tilfælde, hvor tabet er kendt fra målingerne på Jagtvej. Den sorte fuldt optrukne kurve i Figur 27 viser døgnmiddelværdier af de ukorrigerede målinger, mens den røde kurve viser de korrigerede målinger i de perioder, hvor det har været muligt at korrigere.



Figur 27 Den sorte fuldt optrukne kurve viser døgnmiddelværdier beregnet på grundlag af halvtimemålinger (se Figur 19) af PM₁₀ med TEOM-monitor på H.C. Andersens Boulevard. Den stiplede kurve viser de foreliggende målinger af PM₁₀-tab i TEOM-monitorerne på Jagtvej og H.C. Ørsted Institutet i den undersøgte periode. Den røde kurve viser korrigerede værdier af PM₁₀ for H.C. Andersens Boulevard, hvor korrektionen er foretaget ved at addere tabet, der er bestemt på Jagtvej og på H.C. Ørsted Institutet.

Overskridelser af grænseværdier

Årsmiddelværdien og antallet af overskridelser pr. år kan skønnes ud fra det begrænsede antal korrigerede målinger (164 målinger ud af 365). Da alle fire årstider er rimeligt repræsenteret i målingerne, må det skønnes, at den beregnede middelværdi ($46,7 \mu\text{gm}^{-3}$) er et godt skøn på årsmiddelværdien (se Tabel 8). Denne værdi er en overskridelse af grænseværdien for den årlige middelværdi ($40 \mu\text{gm}^{-3}$). Det bedste skøn på det årlige antal af overskridelser af $50 \mu\text{gm}^{-3}$ bliver $365/164 \cdot 59 = 131$. Dette er ligeledes en overskridelse af grænseværdien (35 overskridelser pr. år). Forholdet mellem middelværdierne af korrigeret PM₁₀ og TEOM-PM₁₀ er $46,7/36,1 = 1,30$. Hvis dette forhold bruges som en fast korrektionsfaktor for TEOM-PM₁₀, fås 53 overskridelser ud af 164 mulige, hvilket pr. år svarer til $365/164 \cdot 53 = 118$. Dette tyder på, at antallet af overskridelser kan blive en smule undervurderet, hvis der bruges en konstant korrektionsfaktor.

Tabel 8 Middelværdier af TEOM-døgnmiddelværdier juli 2001 - juli 2002 med og uden korrektion. Den første søjle med TEOM-PM₁₀ gælder for alle målingerne, mens den anden søjle kun gælder for de målinger, det har været muligt at korrigere. Antal overskridelser af $50 \mu\text{gm}^{-3}$ er optalt for korrigeret PM₁₀. Enhed μgm^{-3} .

	TEOM-PM ₁₀	TEOM-PM ₁₀	Korrektion	PM ₁₀ (korrigeret)
Middelværdi	35,8	36,1	10,7	46,7
Antal målinger	233	164	164	164
Antal overskridelser af $50 \mu\text{gm}^{-3}$				59

7.5 Kildebidrag til PM₁₀

Fjerntransport og lokale kilder

Den beregnede middelværdi af PM₁₀ på H.C. Andersens Boulevard viser, at der i de kommende år må forventes en klar overskridelse af grænseværdien på $40 \mu\text{gm}^{-3}$ på årsbasis. Af hensyn til de overvejelser om indgreb, der eventuelt kan foretages for at undgå eller modvirke overskridelsen, er det vigtigt at have en klar idé om hvilke kilder, der bidrager mest til PM₁₀, og man bør, selv om resultatet kan være usikkert, forsøge at kvantificere bidragene. Ved at sammenligne samtidige PM₁₀-målinger med TEOM-monitor (halvtiméværdier) på Jagtvej

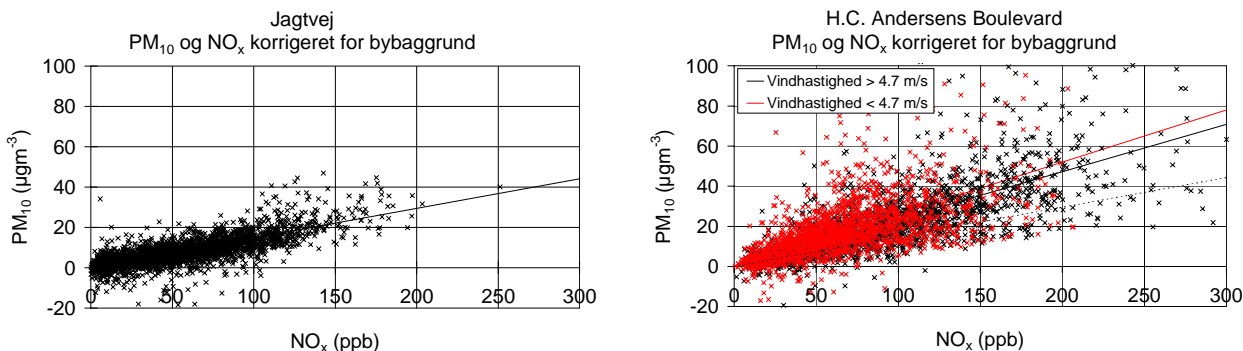
og på taget af det nærliggende H.C. Ørsted Institut viser det sig, at der er en stor grad af samvariation, idet værdierne dog næsten altid er noget større på Jagtvej end på H.C. Ørsted Institutet. Samvariationen skyldes, at et væsentligt bidrag af fjerntransporterede partikler vil være det samme de to steder. Forskellen skyldes, at målestationen på Jagtvej ligger i en gadeslugt, hvor trafikens emissioner i første omgang spredes indenfor et begrænset rumfang mellem husene, mens spredningen i bybaggrund sker indenfor et meget større område, der også dækker de bebyggede arealer mellem gaderne. Dette gælder både for trafikens emission af partikler og af gasser. Trafikken er stort set den eneste kilde til de forhøjede NO_x koncentrationer i en gade, mens forhøjede PM_{10} værdier også kan skyldes andre lokale kilder, så som støvende byggeaktivitet og vindblæst jordstøv.

De lokale kilders bidrag

Hvis måleværdierne i bybaggrund subtraheres fra gademålingerne vil det fjerntransporterede bidrag udgå, og der kan derfor opnås et bedre indtryk af bidragene fra de lokale kilder. Dette er vist for Jagtvej og H.C. Andersen Boulevard i *Figur 28*. For Jagtvej ses en klar lineær sammenhæng mellem lokalt PM_{10} og NO_x , hvilket viser, at trafikken er den dominerende lokale kilde til PM_{10} .

Regressionsliniens hældning viser, at der kan regnes med et nogenlunde konstant forhold mellem trafikens PM_{10} og NO_x bidrag på $0.15 \mu\text{gm}^{-3}/\text{ppb}$. For H.C. Andersens Boulevard er sammenhængen mindre simpel, idet der ses en stor spredning i forholdet mellem lokalt PM_{10} og NO_x . I nogle tilfælde er forholdet det samme som på Jagtvej (vist med den stiplede linie), men hyppigst er det væsentligt højere. Dette peger på, at der på H.C. Andersens Boulevard må være andre betydningsfulde lokale kilder til PM_{10} udover den type trafik, som er fremherskende på Jagtvej. Det er desværre ikke muligt på det foreliggende grundlag at afgøre præcis hvilke kilder, der er tale om. Der kan dog i *Figur 28* ses en tydelig afhængighed af vindhastigheden, som peger på, at vindblæst jordstøv må spille en vis rolle. En ret ubetydelig, men let identificerbar, kilde er fyrværkeriet i Tivoli lørdag aften (se *Figur 21*).

En sandsynlig forklaring på forskellen mellem Jagtvej og H.C. Andersens Boulevard kan også være, at der er mere tung trafik (bl.a. mange busser) på H.C. Andersen Boulevard i dagtimerne, idet tung trafik i forhold til NO_x -emissionen må formodes at ophvirvle relativt mere støv end let trafik. Det er bemærkelsesværdigt, at TSP på H.C. Andersens Boulevard ikke er faldet på samme måde som for de andre målestationer i årene siden 1990 (se *Figur 4*). Dette tyder på, at bidraget af grove partikler fra de lokale kilder har været voksende i denne periode.



Figur 28 Data fra Jagtvej og H.C. Andersen Boulevard målt i perioden april-juni 2002. Sammenligning af PM_{10} og NO_x korrigeret for bybaggrund (værdierne målt samtidigt på H.C. Ørsted Institutets tag er fratrukket). For H.C. Andersens Boulevard er punkterne sorteret efter vindhastigheden, således at den halvdel, der er målt ved de højeste vindhastigheder, er markeret med rødt, mens den anden halvdel er markeret med sort. Den samme opdeling er foretaget ved bestemmelsen af de to regressionslinier.

7.6 Analyse af samtidige PM_{10} data og $PM_{2.5}$ data

$PM_{2.5}$ og PM_{10}

På grundlag af målingerne fra perioden efter den 20. maj 2002, hvor der også er målt $PM_{2.5}$, har det været muligt at foretage en grundigere analyse af data. Her kunne fordelingen både på kilder (trafik og ikke-trafik) og på partikelstørrelse (fine og grove partikler) studeres. Efter gængs terminologi betegnes i det følgende partiklerne $< 2,5 \mu\text{m}$ (massekonzentration = $PM_{2.5}$) som fine (inklusive de ultrafine partikler, hvis masse er næsten forsvindende). Partiklerne i størrelsesintervallet $2,5 \mu\text{m} - 10 \mu\text{m}$ (massekonzentration = $PM_{10} - PM_{2.5}$) betegnes som grove.

Fjerntransport

Ved sammenligning af TEOM-målinger (på halvtimesbasis) af PM_{10} på Jagtvej og på H.C. Ørsted Institutet har det vist sig, at PM_{10} kan opdeles i en trafikfraktion, der er proportional med NO_x koncentrationen ($0,15 \mu\text{gm}^{-3}/\text{ppb} \cdot [NO_x]$), og en rest ($PM_{10} - 0,15 \mu\text{gm}^{-3}/\text{ppb} \cdot [NO_x]$), der stort set er den samme begge steder (se afsnit 0). Overensstemmelsen mellem de to steder er så god, at denne rest kun kan skyldes kilder langt fra både Jagtvej og H.C. Institutet. Høje kilder i København (skorstene) kan bidrage, men vi skønner, at der først og fremmest er tale om fjerntransport fra industrielle kilder i udlandet og fra naturlige kilder (f.eks. havsprøjt og jord/ørkenstøv).

Trafikbidraget

Som vist i afsnit 0 ses der ved sammenligning med PM_{10} på H.C. Andersen Boulevard i nogle tilfælde en tilsvarende god overensstemmelse, når trafikbidraget beregnes på samme måde ($0,15 \mu\text{gm}^{-3}/\text{ppb} \cdot [NO_x]$, se Figur 28), men hyppigt ses der (især ved høje vindhastigheder og i dagtimerne, hvor der er megen tung trafik) et yderligere bidrag, der bl.a. kan skyldes ophvirvlet støv fra gaden og det ret åbne område omkring målestationen (Tivoli, Rådhuspladsen og banearialet). Ved en tilsvarende analyse er der fundet en sammenhæng mellem $PM_{2.5}$ og NO_x , der tyder på, at trafikbidraget til $PM_{2.5}$ er $0,07 \mu\text{gm}^{-3}/\text{ppb} \cdot [NO_x]$. Da der på tidspunktet for denne analyse kun foreligger godt 5 ugers sammenhørende målinger af $PM_{2.5}$ og NO_x , er denne faktor dog endnu noget usikker. Når trafikbidraget til $PM_{2.5}$ subtraheres fra $PM_{2.5}$, fremkommer den fine del af den fjerntransport-

terede PM_{10} , hvorefter den grove del af det fjerntransporterede PM_{10} kan beregnes som resten. Endelig kan PM_{10} -tabet adderes til den totale PM_{10} . Dette tab kan som omtalt i afsnit 7.4 bestemmes ved at sammenligne målingerne med SM200-monitor og TEOM-monitor på Jagtvej og/eller H.C. Ørsted Institutet. Man kan regne med at partikeltabet først og fremmest sker i den fine fraktion (sekundære fjerntransporterede partikler).

Opdelingen i bidrag, der er beregnet efter denne metode, er vist som tidsserie i *Figur 29*. Gennemsnitsbidragene for den pågældende periode er angivet i *Tabel 9*, dels som absolutte tal (enhed $\mu\text{g}/\text{m}^3$), dels i procent. Antallet af overskridelser af $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ var 6 ud af 39 mulige. Den samlede sum i *Tabel 9* er ret sikkert bestemt, mens opdelingen i fine og grove partikler må opfattes som det bedst mulige skøn. Ligeledes kan det bidrag af grove partikler, som er benævnt 'Andet', formentlig i væsentlig grad skyldes ophvirvlet støv fra tung trafik (herunder busser). En begrænset del af PM_{10} på H.C. Andersen Boulevard (13%) skyldes trafikens fine partikler, der især stammer fra udstødningsrørene.

En stor del af PM_{10} skyldes grove partikler fra trafikken

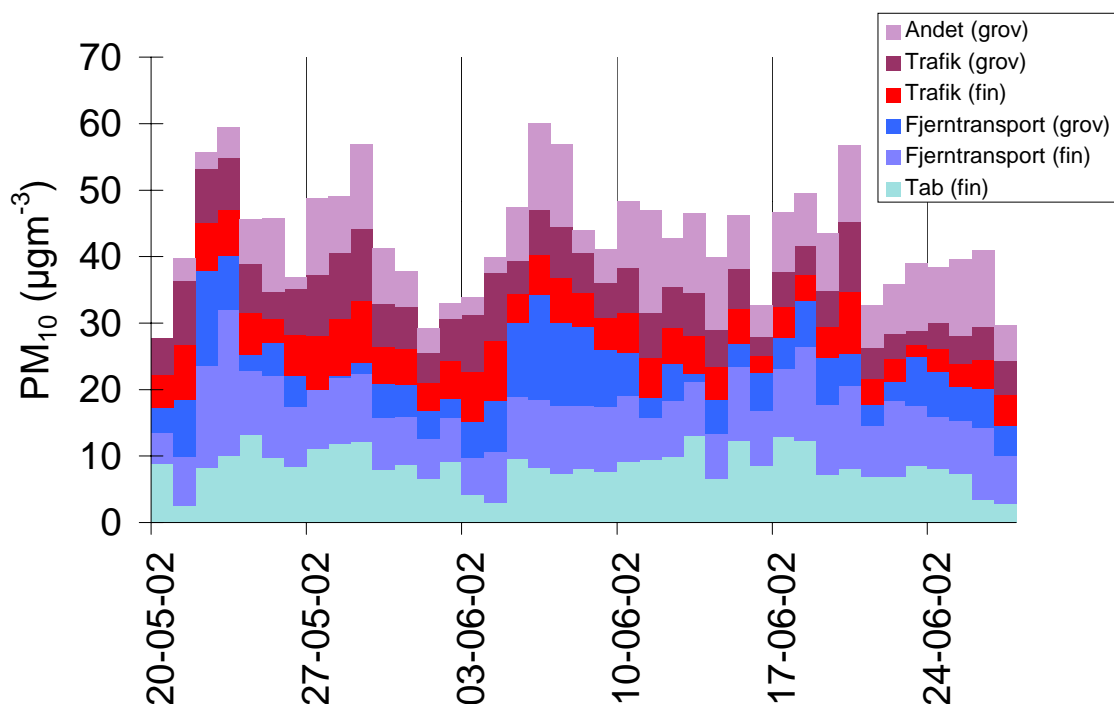
Tabel 9 PM_{10} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) målt med TEOM-monitor (se afsnit 2.2) på H.C. Andersens Boulevard i maj-juni 2002. Målingerne er korrigeret for tab (partikelfordampning). Opdelt i fine og grove bidrag fra trafik, fjerntransport og andre kilder.

	Fin	Grov	Sum
Trafik	5,6 (13%)	6,4 (15%)	11,9 (28%)
Fjerntransport	17,9 (41%)*	5,9 (14%)	23,8 (55%)
Andet**)	0,0 (0%)	7,5 (17%)	7,5 (17%)
Sum	23,5 (54%)	19,8 (46%)	43,2 (100%)

*) Korrigeret for tab ved fordampning

**) F.eks. vindblæst støv og ekstra bidrag af ophvirvlet støv fra tung trafik.

Det er vigtigt at bemærke, at en temmelig stor del af PM_{10} (6,4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, eller 32%, *Tabel 9*) er grove partikler, som ikke er emitteret fra udstødningsrørene, men som alligevel skyldes lokale kilder, formentlig især ophvirvlet støv fra den tunge trafik, hvoraf busserne udgør ca. halvdelen.



Figur 29 Tidsserie af PM_{10} -målinger på H.C. Andersens Boulevard. PM_{10} er korrigeret for partikelfordampningen i TEOM-monitoren og er opdelt i fine og grove bidrag fra trafik, fjerntransport og andre kilder.

7.7 Inde-/udeforhold

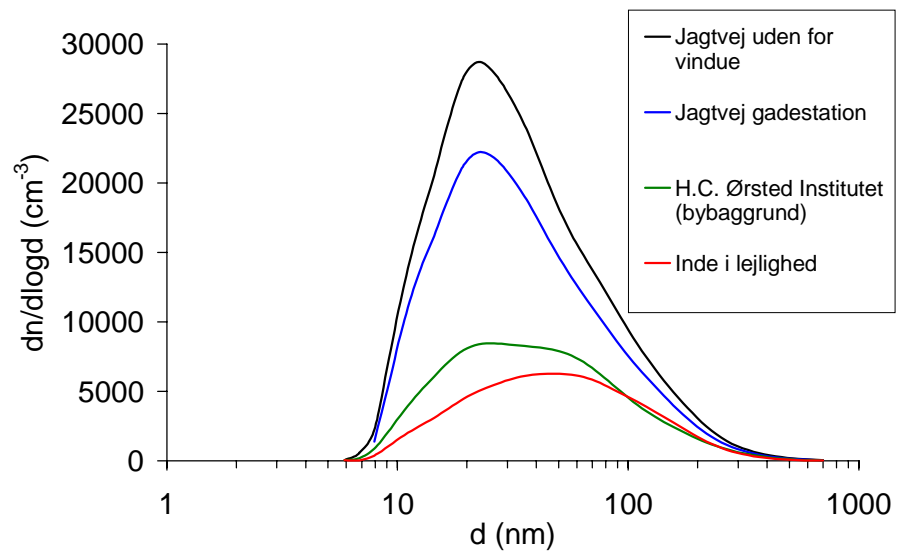
Partikelkilder både ude og inde

Undersøgelser af partikelforekomsten i huse og i lejligheder i byer viser, at denne afhænger både af partikelkoncentrationen udenfor og af indendørskilder. Bidragene fra indendørskilder optræder ofte episodisk i tilknytning til f.eks. rygning, madlavning og brug af stearinlys.

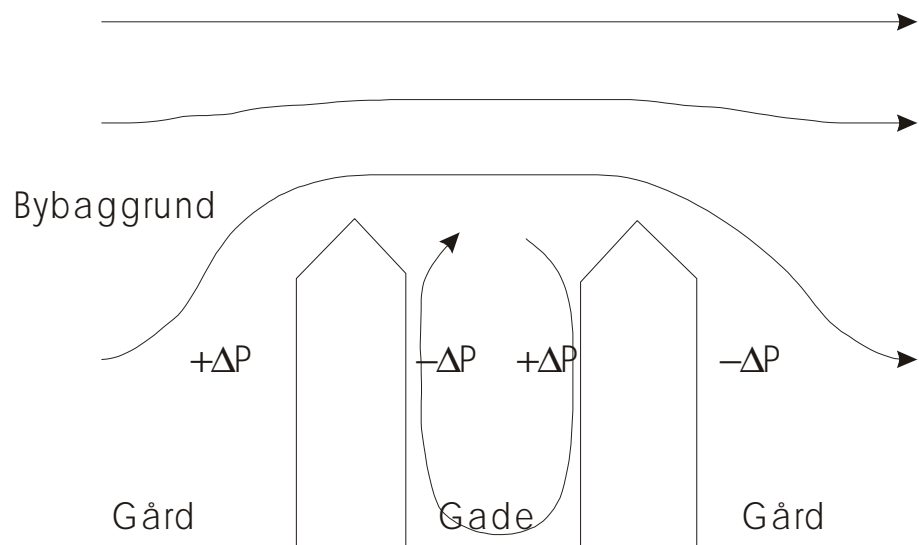
Målinger i København

I en aktuell dansk undersøgelse af forholdene i en ubeboet lejlighed på Jagtvej i København, hvor bidragene fra indendørskilder var forsøgt reduceret til et minimum, viser de første resultater, at bidragene fra udeluften er ganske betydelige. For PM_{10} 's vedkommende var koncentrationen inde i lejligheden tæt på koncentrationen i bybaggrund, hvilket på Jagtvej i gennemsnit er ca. halvdelen af koncentrationen på gaden, og nogenlunde det samme gjaldt for partikelantallet for de større partiklers vedkommende (se Figur 30). For de ultrafine partikler (< 100 nm) kunne det konstateres, at de hurtigt deponeres eller på anden måde forsvinder i lejligheden, således at indendørskoncentrationen bliver mindre end udenfor. Analysen af de mange data fra undersøgelsen er endnu ikke tilendebragt, men meget tyder på, at partikelkoncentrationen i en lejlighed er mere påvirket af bybaggrundsluften end af luften fra selve gaden. Dette kan forstås ud fra de dynamiske trykforhold, som vinden genererer omkring bygningerne i en gadeslugt (se Figur 31). De facader, som bliver direkte udsat for de store partikelkoncentrationer nede fra gaden, bliver samtidigt udsat for et undertryk, der vil modvirke, at luften trænger ind i lejlighederne. På den anden side af gaden, hvor der er overtryk, kommer luften ned oppefra. Denne luft vil være stærkt opblandet med bybaggrundsluft. Naturligvis gælder disse forhold ikke altid, da

der kan forekomme situationer, hvor vinden er parallel med gaden, eller der er vindstille.



Figur 30 Gennemsnitlige partikelfordelinger fra maj-juni 2001. Lejligheden ligger på Jagtvej, tæt ved Nørrebros Runddel, ca. 300 m fra gadestationen på den modsatte side af gaden.



Figur 31 Trykforholdene ved bygningsfacaderne i en gadeslugt (+ ΔP = overtryk, - ΔP = undertryk).

Udvekslingen mellem ude- og indeluft vil dog afhænge meget af ventilationsforholdene, og af hvor tætte vinduer og døre er mod gaden. Det vil således altid være en fordel, at lufte ud ved at åbne de vinduer, der vender væk fra gaden. Man bør ligeledes sørge for, at indtag til mekanisk ventilation tages fra gårdsiden og højt oppe.

8 Konklusioner

Resumé af eksisterende viden

Rapporten er en kort sammenfatning af de hidtil udførte undersøgelser af luftforureningen med partikler i København og et resumé af eksisterende viden. Indtil slutningen af 1990'erne har man kun undersøgt total støv (TSP) og sod. Begge har vist en klart faldende tendens, dog med undtagelse af TSP på H.C. Andersens Boulevard, hvor koncentrationen har været nogenlunde konstant siden 1990.

Partiklers egenskaber og helbredseffekter

I de seneste år er man blevet opmærksom på, at andre parametre måske er afgørende for partiklernes helbredsmæssige effekter. Især menes partikelstørrelsen at være afgørende, men også partiklernes fysiske og kemiske egenskaber har betydning. Derfor er der igangsat mange aktiviteter internationalt med henblik på at undersøge partiklernes egenskaber og deres virkning på menneskers sundhed.

Nye type af målinger

Både i EU og i USA er man gået over til at måle partikler som PM_{10} og $PM_{2.5}$, d.v.s. partikler under 10 henholdsvis 2,5 μm i diameter. I EU arbejdes der på at finde andre mål for partikelforureningen, fx. PM_1 , partikelantal eller andet.

Danske undersøgelser

I Danmark er der målt PM_{10} i forbindelse med det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP IV) og i Københavns Miljøkontrols måleprogram i de seneste år, og i København har man iværksat $PM_{2.5}$ målinger i 2002. Endvidere har DMU iværksat et forskningsprojekt om partikler, det omfatter bl.a. måling af ultrafine partikler i samarbejde med Københavns Miljøkontrol.

Data fra København

Analysen af de eksisterende måledata fra København har vist, at den vigtigste kilde til PM_{10} i bybaggrund er fjerntransport (> 90%). På trafikerede gader, fx. H.C. Andersens Boulevard og Jagtvej, bidrager trafikken dog væsentligt (> 30%). Mere end halvdelen af trafikens bidrag skyldes grove partikler, fx. vejstøv, dækslid, bremses m.v. Det er dog ikke afklaret, hvor sundhedsskadelige disse partikler er. H.C. Andersens Boulevard er det målested i København, der er mest belastet med PM_{10} fra trafikken. Her bidrager de fine partikler fra trafikken efter de foreløbige beregninger med ca. 13%, mens de grove partikler bidrager med op til 32%.

Forholdene indendørs

Partikelkoncentrationen indendørs, hvor folk opholder sig det meste af tiden, er stærkt påvirket af indendørskilder, såsom madlavning, rygning m.m. I de tilfælde, hvor der kan ses bort fra indendørskilder, tyder de foreløbige undersøgelser på, at indendørskoncentrationerne, selv i en lejlighed ived en stærkt trafikeret gade, er nogenlunde som i bybaggrund. Det anbefales dog, at man sørger for, at frisk luft i videst muligt omfang tages fra den side af husene, der vender bort fra gaden.

EU grænseværdier overskrides

De danske (EU) grænseværdier for PM_{10} , som skal overholdes i 2005, er overskredet. Hvis man kunne fjerne alle de fine partikler fra trafikken ville man formentlig kunne komme under disse grænseværdier. En endnu større reduktion i PM_{10} vil kunne opnås, hvis man kunne undgå de ophvirvlede grove partikler fra især den tunge trafik.

Derimod vil det ikke være muligt at komme under de foreslåede grænseværdier, som skal opfyldes i 2010, fordi det fjernttransporterede bidrag for tiden er så stort (ca. $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$), at det alene overskrider de foreslåede grænseværdi for den årlige middelværdi ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Denne del af partikelforureningen må reduceres gennem et Europæisk samarbejde, bl.a. ved at stille krav til emissioner, både af partikler og gasser, sidstnævnte fører til dannelse af sekundære partikler. Der er allerede indenfor EU vedtaget en række krav til emissionen af gasser og partikler fra forskellige typer af nye køretøjer i de kommende år, men det er usikkert om det vil være tilstrækkeligt til at opfylder de foreslåede grænseværdier inden 2010.

Ultrafine partikler er de farligste

De ultrafine partikler, som man mener har de største helbredseffekter, stammer næsten udelukkende fra trafikken. En stor del af disse stammer fra udstødningen fra bilerne, især dieslbilerne. Derfor vil man kunne fjerne en væsentlig del af disse ved hjælp af filtre eller andre tekniske løsninger.

Helbredsskader

Der er foretaget forskellige vurderinger af sygdomme og for tidlige dødsfald som følge af partikelforureningen i København og i Danmark som helhed. Vurderingerne er foretaget af Embedslægen i København, Miljøstyrelsen og senest specifikt for partikler fra tunge køretøjer af en arbejdsgruppe nedsat af Færdselsstyrelsen. I alle tilfælde kommer man frem til en betydelig effekt af partikelforureningen fra trafikken, bl.a. at der sker nogle få hundrede for tidlige dødsfald. Det må dog erkendes, at disse vurderinger er behæftet med meget stor usikkerhed.

Stort behov for målinger og forskning

Der arbejdes målrettet mod at få bedre viden om partikelforureningen (specielt emissionsfaktorer), bl.a. med henblik på at indbygge denne viden i luftkvalitetsmodeller, til analyse af måledata, planlægning, scenarieberegninger og korttidsprognoser. Dette bør fortsættes og styrkes og samordnes med helbredsundersøgelser. Derfor er det vigtigt, bl.a. at fortsætte de påbegyndte undersøgelser i København, hvor vi har den største befolkningseksposering med partikler, specielt fra trafikken. Indtil de seneste år er næsten alle undersøgelser baseret på uspecifikke parametre (TSP, PM_{10} eller sod), som man har forsøgt at sætte i relation til helbredsskader. De fremtidige aktiviteter skal bl.a. omfatte kontinuerte målinger af partikelparametre, som kan sættes i relation til helbredsskader. Derfor er aktiviteter, som er iværksat i København, særdeles vigtige.

Danske undersøgelser

Miljøministeriet har iværksat en række undersøgelser af partikelforureningen. De omfatter undersøgelse af partiklernes egenskaber og deres kilder, tekniske muligheder for at begrænse partikelemissioner, helbredseffekter af partikler og samfundsøkonomiske vurderinger. Disse undersøgelser vil foreløbig løbe frem til udgangen af 2004, og forventes at skabe et langt bedre grundlag for vurdering partikelforureningen, både for Danmark og for Danmarks muligheder for at deltage aktivt i det internationale arbejde på området.

Der vil blive iværksat løbende målinger af ultrafine partikler i bybaggrund (H.C. Ørstedes Institutet), som sammenholdes med akutte helbredsudfald, bl.a. hospitalsindlæggelser, hyppighed af ast-

matilfælde og allergi. Dette er støttet af Indenrigs- og Sundhedsministeriets Miljømedicinske Forskningscenter.

Hvad kan gøres nu i København?

Selv om der fortsat er stor usikkerhed om hvilke typer af partikler, der er de mest skadelige, og det er vanskeligt at kvantificere omfanget af skader, viser mange undersøgelser, at trafikken er det væsentligste danske bidrag til partikelforureningen i København. Da trafikken er den vigtigste kilde til de danske partikelemissioner er der god grund til at søge at begrænse partikelforureningen ved fx.

- at kræve partikelfiltre på tunge køretøjer,
- at forlange filtre på busser ved udlicitering af busruter,
- at undersøge muligheder for indførelse af miljøzoner,
- at tage højde for denne type forurening i trafikplanlægningen,
- at forbedre brændstofkvalitet,
- at begrænse trafikken
- m.m.

Det foreslås derfor, at der udarbejdes scenarier for de forskellige mulige tiltag. Samtidig er det vigtigt at følge udviklingen ved hjælp af målinger med henblik på at dokumentere virkningen af tiltagene.

Referencer

Anderson HR (2000). Differential epidemiology of ambient aerosols. *Mathematical, physical and engineering sciences*. 2000: 2771-85.

Bascom R, Bromberg PA, Costa DA et al. (1996) Health effects of outdoor air pollution. *Am J Respir Crit Care Med* 1996; 153:3-50.

Berkowicz, R. (1999). Air Pollution Modelling. Street Scale Models. pp 223-252. In: Fenger, J., Hertel, O. & Palmgren, F. (Eds.) (1999). *Urban Air Pollution- European Aspects*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 482 p

Cass G.R, Hughes L.A., Bhave P., Kleeman M.J., Allen J.O., Salmon L.G. The chemical composition of atmospheric ultrafine particles. *Phil Trans R Soc Lond A* 2000; 358:2581-2592

DMU, emissioner. http://www.dmu.dk/1_Viden/2_miljoe-tilstand-/3_luft/4_adaei/default.asp

DMU. Luftovervågningsdata. LUFT.DMU.DK

Dockery DW, Pope CA, Xu X et al. (1993) An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *N Engl J Med* 1993 Dec.; 329(24):1753-9.

Dockery DW, Pope CA. (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu Rev Public Health* 1994; 15:107-32.

Donaldson K, Stone V, Clouter A. (2001) Ultrafine particles. *Occup Environ Med* Mar.; 58(3):211-6.

EC (1996). Directive 96/62/EC of September 27 on ambient air quality assessment and management. *J. Europ. Commun.* L296/55.

EC (1999). Directive 1999/30/EC of 22 April 1999 relating to limit values for sulphur dioxide, nitrogen dioxide and oxides of nitrogen, particulate matter and lead in ambient air. *J. Europ. Commun.* L163/41.

EC (2000). Directive of the European Parliament and of the Council 2000/69/EC of 16 November 2000 on limit values for benzene and carbon monoxide in ambient air. *J. Europ. Commun.* L313/12.

EC (2002). Directive 2002/3/EC of the European Parliament and of the Council of 12. February 2002 relating to Ozone in Ambient Air. *J. Europ. Commun.* -L67/14)

Ghio AJ, Kim C, Devlin RB. Concentrated ambient air particles induce mild pulmonary inflammation in healthy human volunteers. *Am J Respir Crit Care Med* 2000 Sept.; 162(3 Pt 1):981-8.

Jaques PA, Kim CS. (2000). Measurement of total lung deposition of inhaled ultrafine particles in healthy men and women. *Inhal Toxicol*; 12(8):715-731.

Kemp, K. & Palmgren, F. (2002): The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2001. National Environmental Research Institute, Roskilde Denmark. xx pp. NERI Technical Report No. xxx. (findes også på luft.dmu.dk)

Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C et al. (1997) Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Air Pollution and Health: a European Approach*. *BMJ* 1997 June; 314(7095):1658-63.

Palmgren, F., Wählin, P., Berkowicz, R., Hertel, O., Jensen, S.S., Loft, S. & Raaschou-Nielsen, O. (2001a): Partikelfiltre på tunge køretøjer i Danmark. Luftkvalitets- og sundhedsvurdering. Danmarks Miljøundersøgelser. 94 s. – Faglig rapport fra DMU, nr. 358.

Palmgren, F., Wählin, P., Berkowicz, R. and Van Dingenen, R. (2001b). Fine Particles from Traffic. Midgley, P.M., Reuther, M. and Williams M. (Eds.) *Proceedings of EUROTRAC Symposium 2000*, Garmisch-Partenkirchen, Germany. Springer Munich.

Pekkanen J, Timonen KL, Ruuskanen J et al. (1997) Effects of ultrafine and fine particles in urban air on peak expiratory flow among children with asthmatic symptoms. *Environ Res* 1997; 74(1):24-33.

Peters A, Wichmann HE, Tuch T et al. (1997) Respiratory effects are associated with the number of ultrafine particles. *Am J Respir Crit Care Med* 1997 Apr.; 155(4):1376-83.

Pope CA III, Burnette RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD. (2002). Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA*; 287: 1132:1141.

Pope CA, Dockery DW, Kanner RE et al. (1999) Oxygen saturation, pulse rate, and particulate air pollution: A daily time-series panel study. *Am J Respir Crit Care Med* 1999 Feb.; 159(2):365-72.

Pope CA, III, Thun MJ, Namboodiri MM et al. (1995). Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. *Am J Respir Crit Care Med* Mar.; 151(3 Pt 1):669-74.

Salvi S, Blomberg A, Rudell B et al. (1999) Acute inflammatory responses in the airways and peripheral blood after short-term exposure to diesel exhaust in healthy human volunteers. *Am J Respir Crit Care Med* 1999 Mar.; 159(3):702-9.

Sarangapani R, Wexler AS. (2000). The role of dispersion in particle deposition in human airways. *Toxicol Sci* Mar.; 54(1):229-36.

Schwartz J. (1994) Total suspended particulate matter and daily mortality in Cincinnati, Ohio. *Environ Health Perspect* 1994 Feb.; 102(2):186-9.

Schwartz J, Dockery DW, Neas LM. (1996) Is daily mortality associated specifically with fine particles? *J Air Waste Manag Assoc* 1996 Oct.; 46(10):927-39.

Seaton A, MacNee W, Donaldson K, Godden D. (1995) Particulate air pollution and acute health effects [see comments]. *Lancet* 1995 Jan.; 345(8943):176-8.

WHO synthesis report. Health costs due to road traffic-related air pollution. (www.who.dk/london99/transport04.htm) 1999.

WHO (2000). Air Quality Guidelines for Europe, Second Edition, WHO Regional Publications, European Series, No. 91, Copenhagen 2000. See also (<http://www.who.int/peh/air/Airqualitygd.htm>)

Wichmann HE et al. (2000). Daily mortality and fine and ultrafine particles in Erfurt, Germany. Health Effects Institute Report.

Wichmann HE, Peters A. (2000) Epidemiological evidence of the effects of ultrafine particle exposure. *Phil Trans R Soc Lond A* 2000 Oct.; 358:2751-69.

Wählin, P., Palmgren, F., Van Dingenen, R., (2001a). Experimental studies of ultrafine particles in streets and the relationship to traffic. *Atmospheric Environment* 35 Supplement No. 1, S63-S69.

Wählin, P., Palmgren, F., Van Dingenen, R. and Raes, F.

(2001b). Pronounced decrease of ambient particle number emissions from diesel traffic in Denmark after reduction of the sulphur content in diesel fuel. *Atmospheric Environment*. Vol 35/21, pp 3549-3552.

Zanobetti A, Schwartz J, Samoli E, Gryparis A, Touloumi. (2002). The temporal pattern of mortality responses to air pollution: a multiplicity assessment of mortality displacement. *Epidemiology*; 13: 87-93

English summary and conclusions

- Summary of the situation in Copenhagen and existing knowledge* The present report is a short summary of the particulate air pollution investigations in Copenhagen and a short summary of the state of the art. The measurements included mainly Total Suspended Particulates (TSP) and black smoke until the late 1990's. They showed a significantly decreasing trend at all monitoring stations in Denmark, except at H.C. Andersens Boulevard in Copenhagen, a busy street in the city centre, where the concentration of TSP has been nearly constant since 1990.
- Properties and health effects of particles* Within the last 10 years it has been realised that other parameters than total mass of the particles are more important in relation to health effects. Especially the sizes of the particles are important, but also the physical and chemical properties seem to play an important role. Many activities have been initiated internationally on investigations of the properties of the particles and the relationship with health effects.
- New types of measurements* Measurements of PM_{10} and $PM_{2.5}$ (particles with a diameter below 10 and 2.5 μm , respectively) are now included in the air quality monitoring programmes in USA and the EU. Within the EU, a review of the limit values is under consideration in order to define more health relevant particle parameters, i.e. particle number, PM_1 or others.
- Danish investigations* PM_{10} has been measured the last few years in the Danish Air Quality Monitoring Programme (LMP IV) and the air quality monitoring carried out by Copenhagen Environmental Protection Agency (CEPA). $PM_{2.5}$ measurements have been carried out in Copenhagen in periods since 2002. In addition, National Environmental Research Institute (NERI) has a four-year particle research project and has in a co-operation with CEPA initiated measurements of ultrafine particles in Copenhagen.
- Data from Copenhagen* The analysis of existing data from Copenhagen has shown that the most important contribution to PM_{10} in urban background is long range transported primary and secondary particles (> 90%). The contribution from traffic at busy streets in central Copenhagen, e.g. H.C. Andersens Boulevard (> 60,000 vehicles per day) and Jagtvej (> 22,000 vehicles per day) is significant (> 30%). More than 50% of the traffic contribution is coarse particles, e.g. from road dust and wear of road surface, tires, brakes etc. However, it is not clear, what the health impact of these coarse particles is. The monitoring station at H.C. Andersens Boulevard is the most PM_{10} exposed site in Copenhagen. The contribution from traffic to fine particles ($PM_{2.5}$) has been estimated to approx. 13%, and the contribution to coarse particles ($PM_{10} - PM_{2.5}$) has been estimated to approx. 32%.
- Indoor pollution* People spend most of their time indoor, where the particle concentration is highly influenced by indoor sources, e.g. cooking, smoking etc. Preliminary studies in Copenhagen indicate that the indoor particle concentrations in apartments without indoor sources are more or less like the urban background concentrations, even in apartments facing

busy streets. However, it is recommended in any case to get fresh air in the apartments from the backyard side of the buildings.

Exceedance of EU limit values

The Danish (EU) air quality limit values, which the Member States have to comply with in 2005, are exceeded at some locations. The particulate pollution could probably be reduced to levels below the limit value, if all fine (exhaust) particles from the road traffic could be removed. A larger reduction could be obtained, if the non-exhaust particles be removed, especially from heavy traffic. However, it would not be possible (by Danish measures alone) to comply with the proposed limit values for 2010, because the long range transported contribution is larger (ca. $22 \mu\text{g}/\text{m}^3$) than the proposed limit value for the annual average ($20 \mu\text{g}/\text{m}^3$). This part of the particulate pollution has to be reduced in a European co-operation, e.g. by reduced emissions of particles as well as gases, which lead to formation of secondary particles. Stronger requirements on reduced emissions from vehicles in the next few years are already adopted in EU, but it is still uncertain whether they are sufficient in relation to the proposed limit values for 2010.

Ultrafine particles are the most hazardous

The ultrafine particles from road traffic seem to be the most hazardous. A large fraction is emitted as exhaust from engines, especially from diesel engines. Efficient filters or other technical solutions can remove a major part of these particles.

Health effects

Several assessment studies of mortality and premature death have been carried out in Denmark, especially in Copenhagen. The assessments were carried out by the Health Inspector of Copenhagen, the Danish Environmental Protection Agency and specifically in relation to the particles from heavy traffic by a group chaired by the Danish Traffic Agency. All the investigations showed a significant impact of the particulate pollution from traffic, i.e. a few hundreds extra premature deaths per year. However, the uncertainties are still very high.

More measurements and research needed

Ongoing applied research aims at a better knowledge about the particulate pollution (including emission factors), especially in order to include particles in the air quality models for analysis, planning, scenario calculations and short-term forecasts. It is important to continue and strengthen this and co-ordinate investigations with health studies. The studies in Copenhagen contribute to this research and should be continued. The exposure of the population is highest in Copenhagen, especially from the traffic. The investigations in relation to health effects were mainly carried out based on rather unspecific air pollution parameters (TSP, PM_{10} or black smoke). Future research should include continuous measurements of parameters, which can be related directly to adverse health effects. The present studies in Copenhagen are important supplements to this type of research.

Danish investigations

The Ministry of the Environment has initiated a research programme on particles. The programme includes several activities, i.e. characterisation of atmospheric particles, particle sources, technical measures, health effects and socio-economic assessments. The programme will run until the end of 2004 and will create an improved basis for

assessment of the particulate pollution in Denmark and Denmark's possibilities to be active in the international co-operation.

Continuous measurements of ultrafine particles will be established at an urban background station (H.C. Ørsteds Institutet), and the data will be related to acute health effects, e.g. hospital admissions and cases of asthma and allergy. The Danish Ministry of the Interior and Health, Research Centre for Environmental Health (ISMF) has funded the study.

What can be done in Copenhagen?

It is uncertain which type of particles that are the most hazardous, and it is difficult to quantify the damages. However, many investigations show that the road traffic is the most important Danish source to the particulate pollution in Copenhagen. The particle emissions from the traffic should therefore be reduced by different measures, e.g.

- particle filters on heavy duty vehicles,
- requirements of filters in tenders for operation of public bus lines,
- environmental zones,
- traffic planning,
- better fuel,
- reduction of traffic
- etc.

It is recommended to prepare scenario calculations on the different realistic measures. In addition, it is necessary monitor the trends in order to document the effects of the measures taken.

Danmarks Miljøundersøgelser

Danmarks Miljøundersøgelser - DMU - er en forskningsinstitution i Miljøministeriet. DMU's opgaver omfatter forskning, overvågning og faglig rådgivning indenfor natur og miljø.

Henvendelser kan rettes til:

URL: <http://www.dmu.dk>

Danmarks Miljøundersøgelser
Frederiksborgvej 399
Postboks 358
4000 Roskilde
Tlf.: 46 30 12 00
Fax: 46 30 11 14

*Direktion
Personale- og Økonomisekretariat
Forsknings- og Udviklingssektion
Afd. for Systemanalyse
Afd. for Atmosfærisk Miljø
Afd. for Marin Økologi
Afd. for Miljøkemi og Mikrobiologi
Afd. for Arktisk Miljø
Projektchef for kvalitets- og analyseområdet*

Danmarks Miljøundersøgelser
Vejsøvej 25
Postboks 314
8600 Silkeborg
Tlf.: 89 20 14 00
Fax: 89 20 14 14

*Overvågningssektionen
Afd. for Terrestrisk Økologi
Afd. for Ferskvandsøkologi
Projektchef for det akvatiske område*

Danmarks Miljøundersøgelser
Grenåvej 12-14, Kalø
8410 Rønde
Tlf.: 89 20 17 00
Fax: 89 20 15 15

*Afd. for Landskabsøkologi
Afd. for Kystzoneøkologi*

Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, temarapporter, samt årsberetninger. Et katalog over DMU's aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter er tilgængeligt via World Wide Web.

I årsberetningen findes en oversigt over det pågældende års publikationer.

Faglige rapporter fra DMU

2001

- Nr. 385: Natur og Miljø 2001. Påvirkninger og tilstand. Af Bach, H., Christensen, N. & Kristensen, P. 368 s., 200,00 kr.
- Nr. 386: Pesticider 3 i overfladevand. Metodeafprøvning. Af Nyeland, B. & Kvamm, B. 94 s., 75,00 kr.
- Nr. 387: Improving Fuel Statistics for Danish Aviation. By Winther, M. 56 pp., 75,00 DKK

2002

- Nr. 388: Microorganisms as Indicators of Soil Health. By Nielsen, M.N. & Winding, A. 82 pp., 90,00 DKK
- Nr. 389: Naturnær skovrejsning – et bæredygtigt alternativ? Af Aude, E. et al. 47 s. (elektronisk)
- Nr. 390: Metoder til at vurdere referencetilstanden i kystvande – eksempel fra Randers Fjord. Vandrammedi- rektiv-projekt. Fase II. Af Nielsen, K. et al. 43 s. (elektronisk)
- Nr. 391: Biologiske effekter af råstofindvinding på epifauna. Af Lisbjerg, D. et al. 54 s. (elektronisk)
- Nr. 392: Næringssaltbegrænsning af makroalger i danske kystområder. Et samarbejdsprojekt mellem Ring- købing Amt, Nordjyllands Amt, Viborg Amt, Århus Amt, Ribe Amt, Sønderjyllands Amt, Fyns Amt, Roskilde Universitetscenter og Danmarks Miljøundersøgelser. Af Krause-Jensen, D. et al. 112 s. (elektronisk)
- Nr. 393: Vildtudbyttet i Danmark i jagtsæsonen 2000/2001. Af Asferg, T. 34 s., 40,00 kr.
- Nr. 394: Søerne i De Østlige Vejler. Af Jeppesen, E. et al. 90 s., 100,00 kr.
- Nr. 395: Menneskelig færdsels effekt på rastende vandfugle i saltvandssøen. Af Laursen, K. & Rasmussen, L.M. 36 s., 50,00 kr.
- Nr. 396: Miljøundersøgelser ved Maarmorilik 1999-2000. Af Møller, P. et al. 53 s. (elektronisk)
- Nr. 397: Effekt af lystfiskeri på overvintrende troldeænder i Store Kattinge Sø. Af Madsen, J. 23 s. (elektro- nisk)
- Nr. 398: Danske duehøges populationsøkologi og forvandling. Af Drachmann, J. & Nielsen, J.T. 51 s., 75,00 kr.
- Nr. 399: NEXT 1998-2003, Pesticider 1 i drikkevand. Samlet rapport over 3 præstationsprøvningsrunder. Af Nyeland, B. & Kvamm, B.L. 43 s. (elektronisk)
- Nr. 400: Population Structure of West Greenland Narwhals. A Multidisciplinary Approach. By Riget, F. et al. 53 pp. (electronic)
- Nr. 401: Dansk tilpasning til et ændret klima. Af Fenger, J. & Frich, P. 36 s. (elektronisk)
- Nr. 402: Persistent Organic Pollutants in Soil, Sludge and Sediment. A Multianalytical Field Study of Selected Organic Chlorinated and Brominated Compounds. By Vikelsøe et al. 96 pp. (electronic)
- Nr. 403: Vingeindsamling fra jagtsæsonen 2001/02 i Danmark. Wing Survey from the 2001/02 hunting sea- son in Denmark. Af Clausager, I. 62 s., 50,00 kr.
- Nr. 404: Analytical Chemical Control of Phthalates in Toys. Analytical Chemical Control of Chemical Sub- stances and Products. By Rastogi, S.C., Jensen, G.H. & Worsøe, I.M. 25 pp. (electronic)
- Nr. 405: Indikatorer for Bæredygtig Transport – oplæg til indhold og strategi. Af Gudmundsen, H. 112 s., 100,00 kr.
- Nr. 408: Blykontaminering af havfugle i Grønland fra jagt med blyhagl. Af Johansen, P., Asmund, G. & Ri- get, F. 31 s. (elektronisk)
- Nr. 409: The State of the Environment in Denmark 2001. Bach, H., Christensen, N. & Kristensen, P. (eds). 368 pp., 200,00 DKK
- Nr. 411: Satellite Tracking of Humpback Whales in West Greenland. Dietz, R. et al. 38 pp. (electronic)
- Nr. 412: Control of Pesticides 2001. Chemical Substances and Chemical Preparations. By Krongaard, T. Petersen, K.K. & Christoffersen, C. 28 pp. (electronic)
- Nr. 413: Vegetation i farvandet omkring Fyn 2001. Af Rasmussen, M.B. 138 s. (elektronisk)
- Nr. 418: Atmosfærisk deposition 2001. NOVA 2003. Af Ellermann, T. (primo december) (elektronisk)
- Nr. 419: Marine områder 2001 - Miljøtilstand og udvikling. NOVA 2003. Af Ærtebjerg, G. (red.) (primo de- cember) (elektronisk)
- Nr. 420: Landovervågningsoplande 2001. NOVA 2003. Af Bøgestrand, J. (primo december) (elektronisk)
- Nr. 421: Søer 2001. NOVA 2003. Af Jensen, J.P. (primo december) (elektronisk)
- Nr. 422: Vandløb og kilder 2001. NOVA 2003. Af Bøgestrand, J. (primo december) (elektronisk)
- Nr. 423: Vandmiljø 2002. Tilstand og udvikling - faglig sammenfatning. Af Andersen, J.M. et al. 56 s., 100,00 kr.

Rapporten er en kort sammenfatning af de hidtil udførte undersøgelser af luftforureningen med partikler i København og et resumé af eksisterende viden. Tidligere undersøgte man total støv (TSP) og sod. Begge har vist en klart faldende tendens, dog med undtagelse af TSP på H.C. Andersens Boulevard, hvor koncentrationen har været nogenlunde konstant siden 1990. EU grænseværdier overskrides visse steder. Andre parametre er måske afgørende for partiklernes helbredsmæssige effekter. Især menes partikelstørrelsen at være afgørende, men også partiklernes fysiske og kemiske egenskaber har betydning. De ultrafine partikler menes at have de største helbredseffekter. En stor del af de ultrafine partikler findes i udstødningen fra bilerne, især dieslbilerne. Da trafikken er den vigtigste kilde til de danske partikelemissioner er der god grund til at søge at begrænse partikelforureningen. I rapporten gives anbefalinger til mulige tiltag, bl.a. partikelfiltre, miljøzoner og renere brændstof.