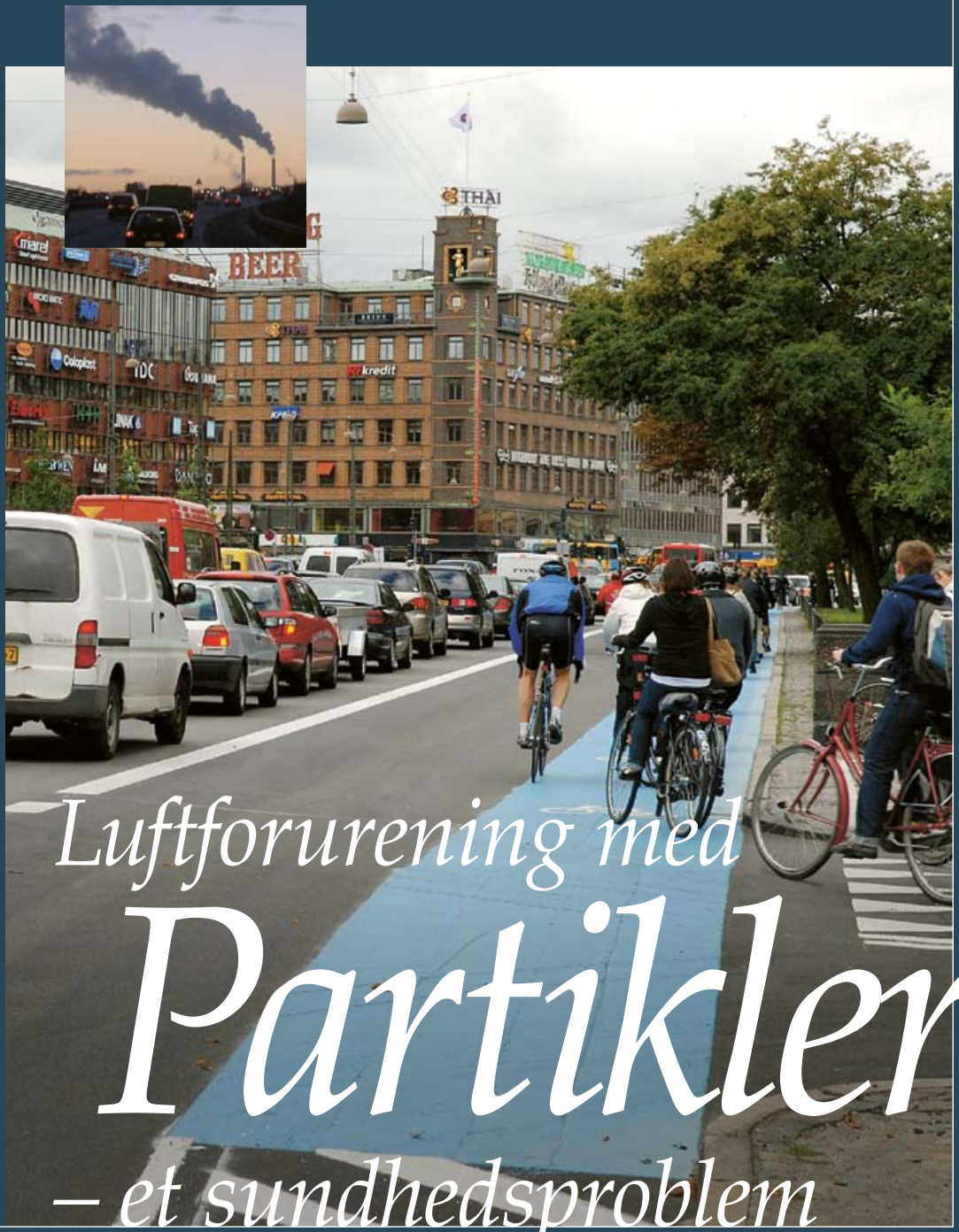
14

MiljøBiblioteket



Luftforurening med Partikler

– et sundhedsproblem

Red. Finn Palmgren

Hovedland

Jesper Christensen er seniorforsker i afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser under Aarhus Universitet. Er uddannet fysiker med bifag i matematik og datalogi fra Københavns Universitet, og Ph.d. i geofysik fra det Naturvidenskabelige Fakultet, Københavns Universitet. Arbejder inden for matematisk modellering af fysiske og kemiske processer i atmosfæren.

Thomas Ellermann er sektionsleder og seniorforsker i afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Er Ph.d. i atmosfærekemi og arbejder i dag med forskning og overvågning med fokus på luftforureningen i Danmark. Er ansvarlig for overvågning af luftforureningen i Danmark.

Ole Hertel er sektionsleder og seniorforsker i afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Er Ph.d. i atmosfærekemiske modeller og arbejder med matematiske modeller bl.a. i forbindelse med vurdering af luftforureningseksponering af mennesker og natur.

Jytte Boll Illerup er seniorrådgiver og har været ansat som sektionsleder i afdeling for System Analyse, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Arbejdsområdet har omfattet opgørelse af emissioner og opbygning af modeller til beregning af emissioner fra forskellige samfundssektorer og kilder. Er uddannet kemiingeniør og har en Ph.d. fra DTU Kemiteknik, som også er den nuværende arbejdsplads.

Matthias Ketzel er seniorforsker i afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Er uddannet fysiker med Ph.d. inden for modellering af ultrafine partikler og arbejder med modellering af luftforureningseksponering med fokus på trafikkilder.

Steffen Loft er professor, dr. med. og afdelingsleder i Afdeling for Miljø og Sundhed, Institut for Folkesundhedsvidenskab, Københavns Universitet. Arbejder med helbredseffekter af partikulær luftforurening på befolkningsplan, med udsatte mennesker og i dyreforsøg samt reagensglasforsøg. Arbejder endvidere på at udvikle individuel eksponeringsvurdering, især for partikulær luftforurening, i form af modeller, personbårne målere og biomarkører.

Finn Palmgren var seniorforsker og sektionsleder i afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet, og gik på pension 1. maj 2008. Er uddannet civilingeniør og har en Ph.d. fra DTU i faststoffysik. Er specialist i overvågning og forskning inden for luftkvalitet og har arbejdet med forskning af partikler i luften. Han var leder af sektionen for luftforurening i forbindelse med energiformer og -forbrug samt partikler.

Morten Winther er seniorrådgiver i afdeling for System Analyse, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Er uddannet civilingeniør, og beregner de årlige emissioner fra transport og andre mobile kilder i Danmark. Udvikler derudover emissionsmodeller og gennemfører diverse forsknings- og udredningsopgaver inden for emissioner og mobile kilder.

Peter Wåhlin er seniorrådgiver i afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet. Er uddannet fysiker og kemiker med speciale inden for aerosolfysik og arbejder med grundstofanalyse, målinger på aerosoler, og matematiske receptormodeller i forbindelse med bestemmelse af kilder til luftforurening.

14
MiljøBiblioteket

Luftforurening med partikler
– et sundhedsproblem

Redigeret af:
Finn Palmgren

Med bidrag af:
Jesper Christensen
Thomas Ellermann
Ole Hertel
Jytte Boll Illerup
Matthias Ketzel
Steffen Loft
Finn Palmgren
Morten Winther
Peter Wåhlin

Danmarks Miljøundersøgelser,
Aarhus Universitet

2009

Hovedland

Luftforurening med partikler – et sundhedsproblem

Redigeret af Finn Palmgren

Med bidrag af: Jesper Christensen, Thomas Ellermann, Ole Hertel, Jytte Boll Illerup, Matthias Ketzel, Steffen Loft, Finn Palmgren, Morten Winther og Peter Wåhlin.

© 2009 Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet, forfatterne og Forlaget Hovedland

Alle rettigheder forbeholdes.
Ingen del af denne bog må gengives, lagres i et søgesystem eller transmitteres i nogen form eller med nogen midler grafisk, elektronisk, mekanisk, fotografisk, indspillet på plade eller bånd, overført til databanker eller på anden måde, uden forlagets skriftlige tilladelse.

Enhver kopiering af denne bog må kun ske efter reglerne i lov om ophavsret af 20. juni 2008 med evt. senere ændringer. Det er tilladt at citere med kildeangivelse i anmeldelser.

Forlagsredaktion: Anne Drøgemüller Hansen
Illustrationer og ombrydning: Britta Munter, Grafisk Værksted, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet
Omslag: Grafisk værksted, Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet
Omslagsfotos: DMU

Tryk: Arco Grafisk

Denne bog er trykt på 130 g Cyclus Print
Overskydende papir er genbrugt

ISBN 978-87-7070-126-6

1. udgave, 1. oplag 2009

Forlaget Hovedland
www.hovedland.dk
E-mail: mail@hovedland.dk

Forord 6

1

Partikler som luftforurening 9

2

Hvad er partikler? 15

3

Udledning af partikler 35

4

Eksponering med partikler 53

5

Helbredseffekter af partikler 71

6

Hvordan kan vi begrænse partikelforureningen? 83

7

Ved vi nok, og er der nye trusler? 97

Litteratur 102
Ordliste 106
Stikordsregister 109

Forord

Partikler i luften er et af de største luftforureningsproblemer i byer verden over. Denne forurening er erkendt som et alvorligt miljø- og sundhedsproblem internationalt, herunder af WHO og EU. Også i Danmark har vi dette problem, bl.a. er der konstateret helbredseffekter som følge af de partikler, vi indånder. Emnet har i de senere år været meget fremme i medierne og dermed i den offentlige debat og på den politiske dagsorden. EU har derfor indført strengere krav til begrænsning af partikelforureningen via grænser for udledninger fra en række forureningskilder og nye grænseværdier for partikelforureningen. Udover EU-reguleringen, som er indført i dansk lov, har Danmark indført skærpede lokale regler, bl.a. miljøzoner og krav til lave udledninger af partikler fra brændeovne.

Gennem forskning og overvågning har Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet (DMU) bidraget væsentligt til en langt bedre viden på området. Da forureningen med partikler er et internationalt problem, og fordi partikelforureningen bliver transporteret over store afstande, foregår denne forskning i et internationalt samarbejde. Denne viden er formidlet gennem internationale videnskabelige artikler, rapporter, populære artikler og i medierne. Emnet er dog meget kompliceret, og der er mange misforståelser i den offentlige debat. Der er derfor behov for at formidle denne viden på et fagligt grundlag og samlet på en let tilgængelig måde.

Debatten om partikler har nu kørt en del år i offentlighed og i den politiske verden, og der er opbygget megen viden på DMU og andre institutter. Det er derfor det rette tidspunkt at få skrevet denne bog om emnet.

Bogen behandler alle aspekter af forureningen med partikler fra beskrivelse af partikler over udledninger, spredning, menneskers eksponering, sundhedseffekter og regulering. Hovedvægten ligger på danske forhold og betydningen for befolkningens sundhed.

Der findes en litteraturliste med forslag til videre læsning for interesserede, og i øvrigt findes en samling af information på DMU's hjemmeside.

Forfatterne takker alle, der har givet værdifuld hjælp med udarbejdelse af bogen og de mange forskere og teknikere, der har medvirket til forskningen på området.

Vejtrafikken er en væsentlig kilde til partikelforurening, og vi bliver udsat for den, når vi færdes i byen.
Foto: Britta Munter.

1 Partikler som luftforurening

Vi har været udsat for partikelforurening i mange hundrede år, men forureningen har skiftet karakter i takt med den teknologiske udvikling. I dag er luftforurening med partikler et alvorligt sundhedsproblem i mange byer verden over. Lave kilder i byen, fx trafikken og røg fra brændeovne, udsætter os for en kraftig forurening, mens høje kilder, som skorstene fra kraftværker og lignende, påvirker os mindre. Langtransporteret forurening fra det øvrige Europa er også af stor betydning i Danmark. Foran os ligger store udfordringer, hvis vi vil reducere forureningen.

Foto: Hans Nielsen.

Figur 1-1
Planter udskiller forskellige stoffer, bl.a. luftformige organiske forbindelser, VOC (volatile organic compounds), fx terpener. Disse stoffer spiller en rolle for partikelforureningen, som vi her kan se som dis. Vilde brande i skove og anden vegetation giver også anledning til store mængder af partikler i luften.
Foto: Finn Palmgren.

Hvorfor forurener partikler?

Partikler er meget små samlinger af faste stoffer eller små dråber af væske. De kan også være faste partikler med en væskefilm udenom, eller de kan være samlinger af faste og flydende små partikler.

Der findes mange naturligt dannede partikler i luften, fx havsalt, jordstøv, tåge og lignende, som vi altid har været udsat for (figur 1-1). Vores levevis har imidlertid ført til dannelse af mange nye typer af partikler, som formentlig er mere skadelige end partikler fra naturlige kilder. Det gælder fx sod fra dieselbiler og brændeovne, slibestøv fra bearbejdning af træ og metaller, samt små dråber af olie, tjære og sprøjtemaling.

I dag skyldes den største partikelforurening i Danmark partikler, som bliver dannet af forureningen i det øvrige Europa, og som bliver transporteret med vinden til Danmark. Hertil kommer den lokale partikelforurening fra især trafikken (fx biler og skibe) og fra opvarmningen af vores boliger (brændeovne). Desuden er der partikelforurening fra kraftværker og industrier.

Når vi taler om partikelforurening, tænker vi typisk på de typer af partikler, som er et resultat af vores levevis. De hører ikke naturligt hjemme i vores miljø, og de er sundhedsskadelige, fordi de er så små, at de kan transporteres

dybt ned i vore lunger. Her kan de beskadige lungevævet og/eller optages direkte i lungevævet eller i blodbanen og i værste fald medføre hjerte-kar-sygdomme, astma og kræft.

Små partikler under en bestemt størrelse kan transporteres helt ud i de mindste lungeblærer (alveoler) og dermed ud i blodbanerne. Desuden kan de små partikler virke som transportører af sundhedsskadelige stoffer, som dermed optages i kroppen.

Hvornår erkendte vi problemet?

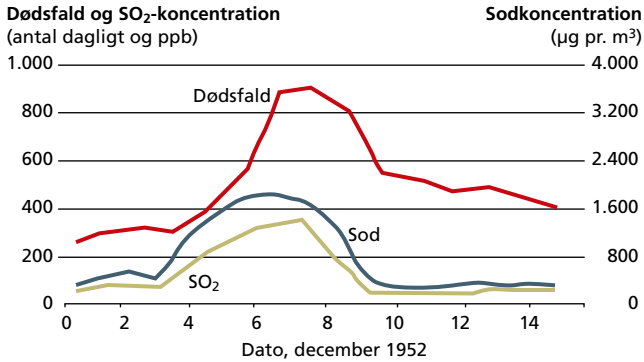
Mennesket har været udsat for partikelforurening i årtusinder i form af naturlige saltpartikler fra havet, støv fra jorden, røg fra vulkaner og skovbrande. Da mennesket begyndte at bruge ild, opstod partikelforurening omkring bålet, i huler og senere i vore huse (figur 1-2).

I løbet af 1800-tallet, da industrialiseringen satte ind, begyndte man for alvor at bekymre sig om partikelforureningen i England. Man havde en kraftig partikelforurening fra kulminer, stålværker, cementfabrikker m.v.

I nyere tid har vi især hørt om luftforureningskatastrofen i december 1952 i London (figur 1-3). Under og lige efter episoden døde omkring 4.000 mennesker som følge af smog, og det skønnes, at der efterfølgende døde yderligere omkring 8.000. På grund af stille vejr og røg fra kulfyring var koncentrationerne af svovldioxid (SO_2) og partikler meget høje. Forureningen nåede op på 100 gange det niveau, vi i dag måler i København.

Figur 1-2
I jernalderen og i vikingetiden var husene fyldt med røgpartikler i forbindelse med madlavning og opvarmning, og beboerne var derfor udsat for en massiv partikelforurening.
Foto: Klima-X-forsøget, Lejre Forsøgscenter.

Figur 1-3
Smogepisoden i december 1952 i London gav anledning til en kraftig stigning i antallet af dødsfald, som skete lidt forsinket i forhold til luftforureningen.
Kilde: www.portfolio.mvm.ed.ac.uk/studentwebs/session4/27/greatsmog52.htm.

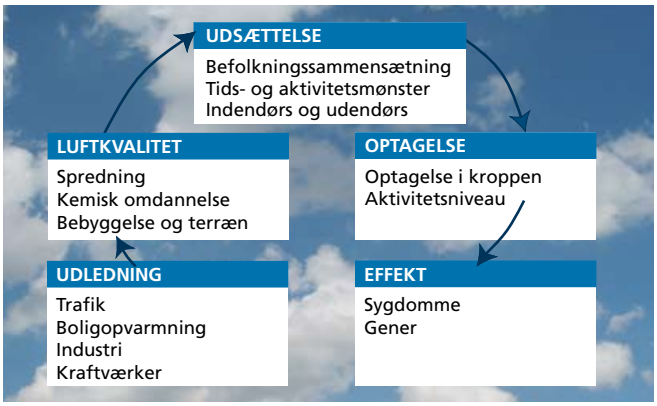


Allerede i 1930 havde man en mindre kendt luftforureningsepisode ved floden Meuse i Belgien. Området var på det tidspunkt et af de mest industrialiserede områder i Europa med en produktion af bl.a. stål, zink, glas og kunstgødning. På grund af de store udledninger af partikler fra de mange virksomheder og en dårlig spredning af forureningen i Meuse-dalen, blev koncentrationen af partikler meget høj i stille vejr. Det skete bl.a. i december 1930. Der er ingen målinger fra området, men ved hjælp af beregninger skønner man, at koncentrationen af svovlsyre (H_2SO_4) var oppe på 4 mg pr. m^3. Der var tale om en voldsom partikelforurening – op mod 1.000 gange det niveau, vi i dag finder i København. Episoden gav anledning til mange luftvejsproblemer for befolkningen i byen Engis, hvor mindst 60 dødsfald kunne relateres direkte til episoden.

Figur 1-4
Partikelforureningen har trukket store overskrifter i aviserne de seneste år.

Partikelforurening trækker overskrifter

Partikler fra trafikken har de senere år været et meget varmt emne i Danmark (figur 1-4), såvel som i resten af verden. Emnet er ofte behandlet sensationelt i pressen. Debatten har sat fokus på partikler, som i dag anses for at være den type af luftforurening, som er mest skadelig for vores helbred. Derfor arbejder man på at reducere partikelforureningen i EU, som har en omfattende lovgivning på området. Denne lovgivning bliver overført til dansk lov i form af krav til udledninger og til luftkvaliteten. Også i andre dele af verden, fra USA til Kina og i mange ulande, hvor problemerne er betydeligt større, arbejder man på at reducere partikelforureningen.



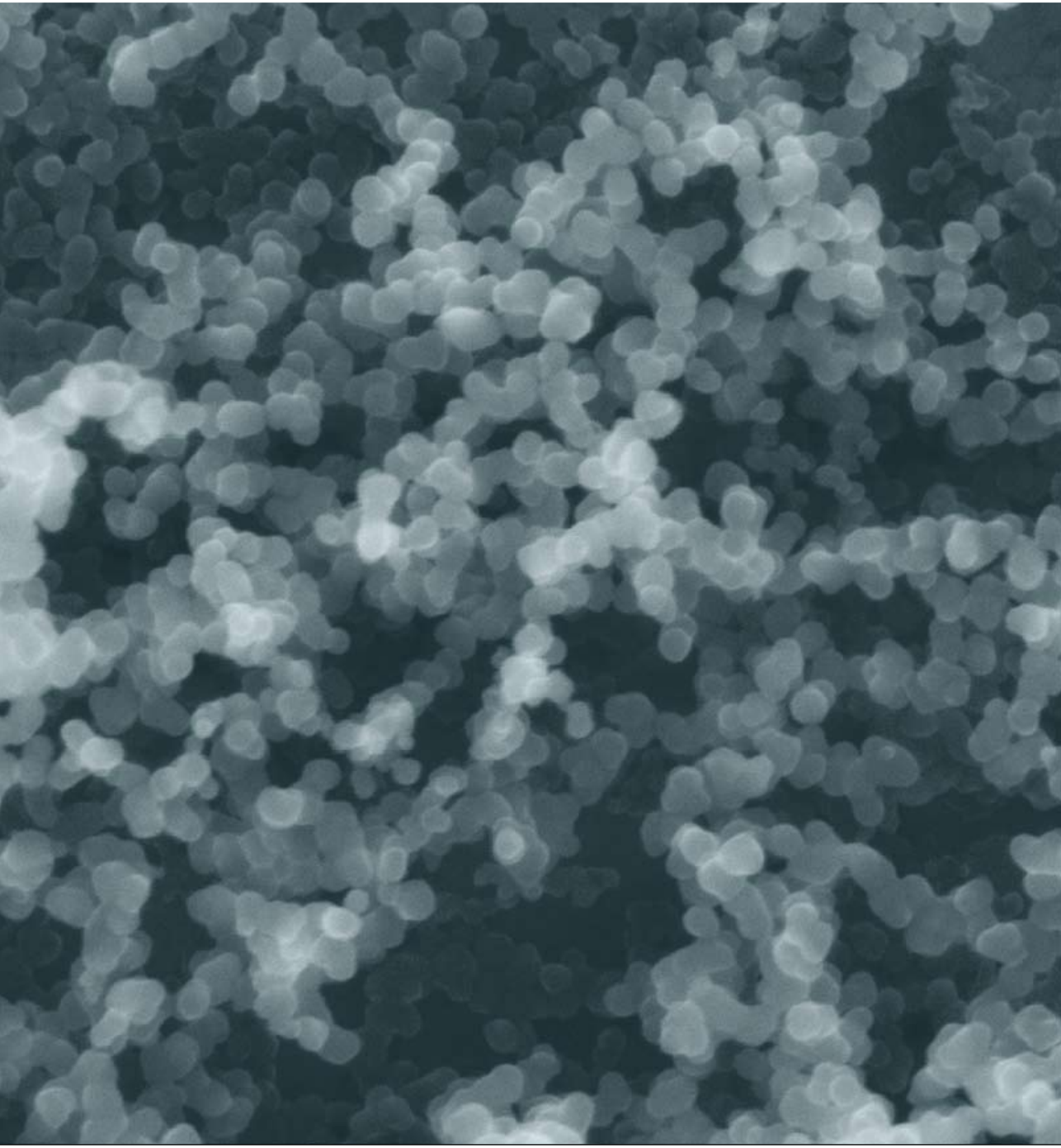
Figur 1-5
Partikelforureningen af et kompliceret problem, som omfatter alle trin fra udledning over transport i luften, påvirkning af mennesker og miljø samt deraf følgende sygdomme og gener.

I Danmark har vi gjort en ekstra indsats for at begrænse udledningerne af partikler fra trafikken og brændeovne, da disse kilder udleder partikler i en lav højde, fx i gader og boligområder, hvor mennesker færdes. Man har indført miljøzoner i de større byer og specielle krav til anvendelse af brændeovne. Hovedparten af de øvrige kilder, fx kraftværker og industrianlæg, har for det meste høje skorstene, hvilket betyder, at forureningen bliver fortyndet, før den når ned til os mennesker. Der er dog også indført strenge regler for udledning af al luftforurening fra sådanne anlæg.

Afgrænsning og opbygning af bogen

Denne bog giver en oversigt over partikelforureningen og dens effekter i Danmark med fokus på den almindelige udendørs luftforurening. Da partikelforureningen i Danmark imidlertid er stærkt påvirket af forureningen fra det øvrige Europa og i noget omfang fra lande uden for Europa, vil vi også behandle den regionale og globale partikelforurenings betydning for Danmark. Vi beskriver partiklers egenskaber, spredning i luften, deres afsætning på overflader, optagelse i vores luftveje, human eksponering, helbredseffekter, regler og grænseværdier samt mulighederne for at reducere forureningen (figur 1-5).

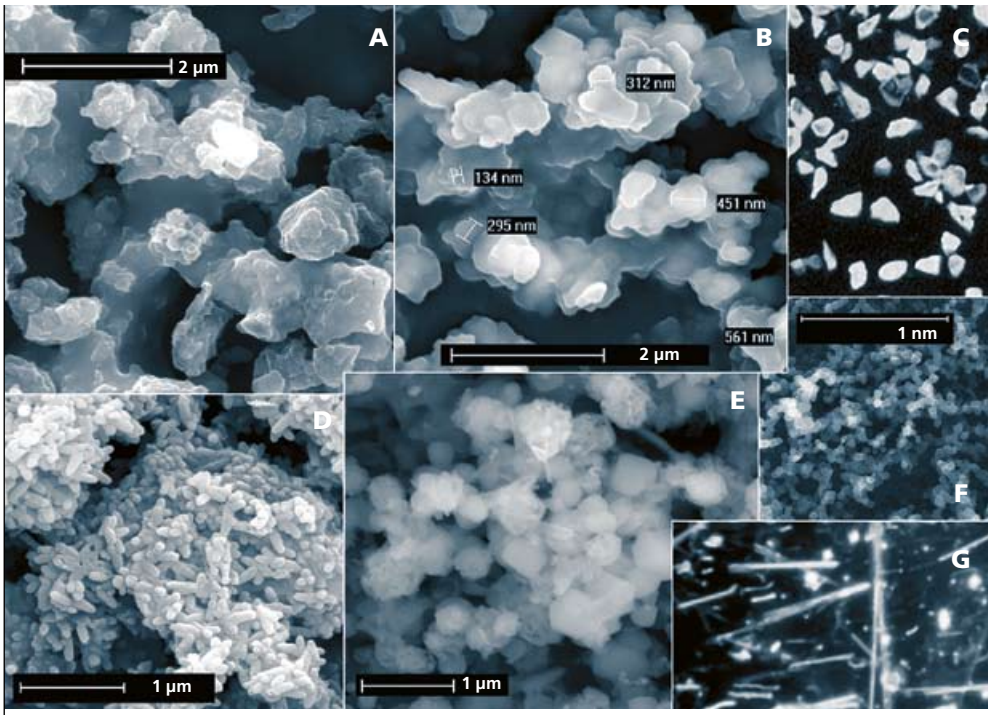
Bogen omhandler ikke partikler i form af pollen, allergener og partikler dannet i det indendørs miljø, i arbejdsmiljøet m.v. Partiklernes rolle for klimaændringer (drivhuseffekten) vil kun blive dækket i et meget begrænset omfang.



2 Hvad er partikler?

Vi omtaler ofte partikler, som var de et stof ligesom svovldioxid, kvælstofdioxid, ozon m.v. Partikler kan imidlertid indeholde mange forskellige stoffer. De kan drive med vinden over korte og lange afstande, og undervejs bliver de udsat for kemiske og fysiske omdannelser.

Foto af sodpartikler: Jacob B. Markussen, FORCE Technology.



Figur 2-1
Mikroskopbilleder af forskellige slags partikler:
A: Partikler fra affaldsforbrændingsanlæg
B: Partikler fra forbrænding
C: Krystaller (jordstøv)
D: Pigmenter
E: Partikler fra affaldsforbrænding
F: Sod
G: Asbest
Foto: FORCE Technology.

Dannelse af partikler

Partikler har vidt forskellige former og størrelser. De kan være dråber af væske eller faste stoffer, og de kan have former som kugler, kantede krystaller og nåle, og de kan være uregelmæssige samlinger af mindre partikler (figur 2-1).

Man opdeler partikler i en række størrelsestyper. Partikler, der er mindre end 0,1 µm, kalder vi ultrafine partikler. Partikler, der er mindre end 2,5 µm, kalder vi fine partikler, mens vi kalder partikler, der er større end 2,5 µm, grove partikler.

De mange forskellige slags partikler i luften skyldes, at partiklerne kommer fra forskellige kilder. Nogle kilder udleder partiklerne direkte til luften. Disse partikler kalder vi primære partikler. Andre kilder udleder forskellige luftarter, som via kemiske og fysiske processer i atmosfæren fører til dannelse af partikler. Vi kalder disse partikler for sekundære partikler. Både primære og sekundære partikler kan stamme fra menneskelige aktiviteter og naturlige kilder (boks 2-1).

I det følgende vil vi kort beskrive nogle af de vigtigste processer, som danner partikler.

Primære partikler

Primære partikler kommer fra en lang række menneskelige aktiviteter, bl.a. trafik og opvarmning af vores boliger.

Dieselkøretøjer og køretøjer med specielle benzinmotorer, der kører på en mager benzin/luft-blanding udleder partikler, der har et stort indhold af kulstof (sod). Endvidere slider alle biler på vejene, hvorved der dannes partikler, som hvirvelvinde fra trafikken og blæsten fører op i luften. Hvis man bruger pigdæk, dannes der særligt mange partikler som følge af slid på vejene. Slid på bilernes dæk og bremser (især åbne skivebremser) fører også til luftforurening med partikler.

Boks 2-1

Eksempler på kilder til primære og sekundære partikler

Primære partikler

Forbrændingsprocesser
- Udstødning fra transportmidler og landbrugsmaskiner
- Røg fra forbrændingsanlæg (brændeovne, kraftværker, industri)

Støv
- Slid på dæk, bremser og veje
- Husdyr, industrianlæg, kullagre
- Havsprøjt, jordstøv og vulkaner

Sekundære partikler

Forbrændingsprocesser
- Svovldioxid (SO_2)
- Kvælstofoxider (NO_x)
- Flygtige organiske forbindelser (VOC)

Landbrug
- Ammoniak (NH_3)

Opløsningsmidler
- Kulbrinter

Planter
- Kulbrinter

Foto: Peter Wåhlin.

Foto: Kørlund Auto, Allerød.

Både dieselmotorer og skivebremser udleder primære partikler.

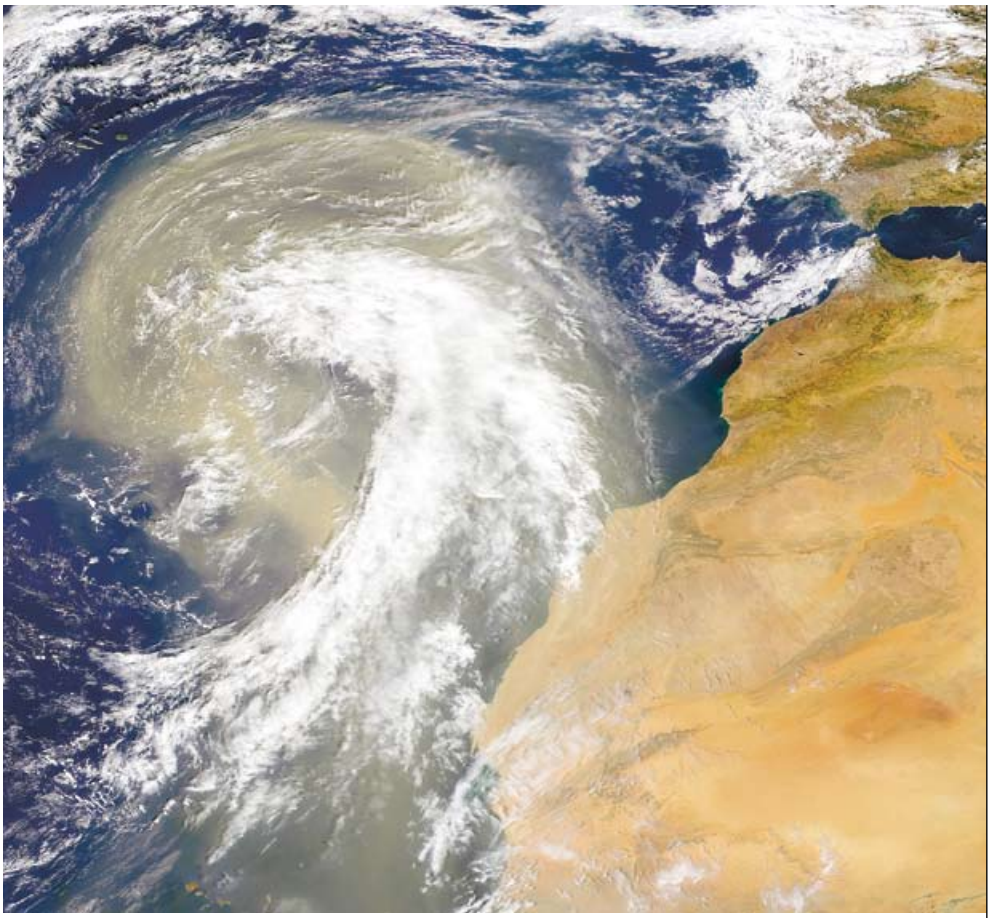
Figur 2-2
Kulholdige partikler ses som sort røg fra en brændeovn under optænding.
Foto: Peter Wåhlin.

Brændeovne og andre ildsteder udleder også primære partikler (figur 2-2). En del af disse partikler er små dråber af tjærestoffer, som bliver dannet, når røgen bliver afkølet i skorstenen og i luften efter skorstenen. Partiklerne fra brændeovne indeholder desuden mindre mængder af sukkerlignende nedbrydningsprodukter af cellulose samt kulstof (sod) og aske. Mængden af disse stoffer i røgen afhænger af temperaturen og lufttilførslen i ildstedet.

Der findes en række andre kilder til primære partikler, fx kraftværker og industrianlæg. De bidrager ikke i et væsentligt omfang til den lokale partikelforurening, fordi lovgivningen regulerer disse kilder, bl.a. ved at sætte grænser for udledningen og krav om høje skorstene, som sikrer, at koncentrationen af partikler ved jordoverfladen er lav. Dog bidrager de høje kilder til den regionale forurening.

Der findes tillige en række naturlige kilder til primære partikler. En af disse kilder er havet. Når de hvide skumtoppe på bølgerne brister i stærk vind, bliver der dannet små dråber af saltvand (figur 2-3). Hvis disse dråber tørrer ind, inden de falder ned og rammer havet igen, bliver de til faste partikler, som kan holde sig svævende i lang tid og blive ført hundredvis af kilometer med vinden. Dråberne består hovedsageligt af natriumklorid (NaCl). I forbindelse

Figur 2-3
Havsprøjt er en naturlig kilde til primære partikler. De kan her ses som en dis langs kysten.
Foto: Med tilladelse: www.cornwallcam.co.uk.



Figur 2-4
Et dybt lavtryk har ført støv fra Sahara ud over Atlanterhavet. Støvet kan her ses som en gullig farve over havet.
Foto: www.visibleearth.nasa.gov.

med vestenstorme ser vi høje koncentrationer af saltholdige partikler over store dele af Danmark. Andre saltholdige partikler ophvirvles af trafikken om vinteren i forbindelse med, at vi salter vores veje.

En anden type af vindskabte partikler stammer fra ophvirvlet materiale fra tørre jord- og sandområder. I Danmark er det oftest sandjorde i fx Sønderjylland, som på tørre dage med blæsevejr giver anledning til "støvstorme". I det sydlige Europa, især i Grækenland, Italien og Spanien, ser man ofte støvskyer fra Sahara (figur 2-4). Undertiden bliver støvpartiklerne transporteret meget langt væk fra oprindelsesstedet, og i enkelte tilfælde har vi i Danmark observeret støv fra Sahara.

Sekundære partikler

Sekundære partikler bliver dannet ud fra forskellige luftarter via en række kemiske og fysiske processer i atmosfæren. Dannelsen af sekundære partikler i atmosfæren er meget kompleks, og udledninger fra mange forskellige kilder påvirker partiklernes indhold.

Udledninger af gasser som svovldioxid (SO_2) og kvælstofoxider (NO_x) fra forbrændingsprocesser og ammoniak (NH_3) fra landbruget fører til dannelse af de såkaldte sekundære uorganiske partikler, fx ammoniumsulfat ($(NH_4)_2SO_4$). Dannelsen af sekundære uorganiske partikler er nærmere beskrevet i boks 2-2.

En lang række naturlige kilder, fx skovbrande og fordampning fra vegetation m.v. samt visse menneskeskabte kilder, fx afbrænding af marker og fyring med brænde og halm, udskiller såkaldte flygtige organiske forbindelser (Volatile Organic Compounds, VOC), som fører til dannelse af sekundære organiske partikler i atmosfæren. VOC bliver omdannet til andre kemiske forbindelser, der er mindre flygtige. Derfor sætter de sig ofte på eksisterende partikler, som dermed vokser i størrelse. En del af de organiske

Afbrænding af marker medfører en udledning af store mængder af partikler og flygtige organiske stoffer (VOC).

Foto: Britta Munter.

Boks 2-2

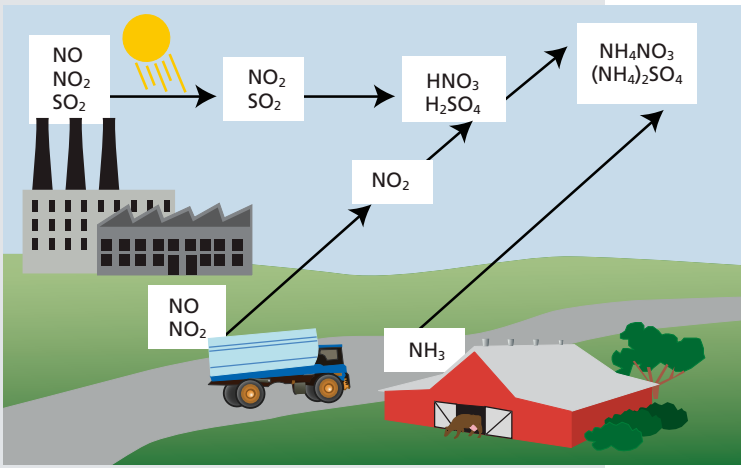
Dannelse af sekundære partikler

Dannelsen af sekundære partikler som ammoniumsulfat ($(NH_4)_2SO_4$) sker i en række trin.

- Sollys (hν) starter en kemisk reaktion mellem luftens ozon (O_3) og vanddamp (H_2O), hvilket resulterer i dannelsen af et hydroxylradikal (HO•), som – lidt forsimplet – kan udtrykkes:
  $O_3 + H_2O \xrightarrow{h\nu} O_2 + 2HO\bullet$
- Svovldioxid (SO_2) reagerer derefter med hydroxylradikalet, hvorved der dannes et hydrogensulfitradikal ($HOSO_2\bullet$), som reagerer med vand, hvilket fører til dannelse af svovlsyre (H_2SO_4), som findes på partikelform (dråber) i atmosfæren:
  $SO_2 + HO\bullet \rightarrow HOSO_2\bullet$
  $HOSO_2\bullet + O_2 \rightarrow HO_2\bullet + SO_3$
  $SO_3 + H_2O \rightarrow H_2SO_4$
- I det næste trin optager partiklerne ammoniak (NH_3), hvilket fører til dannelse af partikulært bundet ammoniumsulfat:
  $H_2SO_4 + 2\ NH_3 \rightarrow (NH_4)_2SO_4$
- I et andet sæt af reaktioner omdannes kvælstofoxider (NO og NO_2) og ammoniak til ammoniumnitrat (NH_4NO_3). Kvælstofoxiderne bliver hovedsageligt udsendt som kvælstofmonoxid (NO), men via en hurtig reaktion med ozon dannes kvælstofdioxid (NO_2):
  $NO + O_3 \rightarrow NO_2 + O_2$
- I luften omdannes kvælstofdioxid videre til gasformig salpetersyre (HNO_3) ved en reaktion med et hydroxylradikal:
  $NO_2 + HO\bullet \rightarrow HNO_3$
- Herefter kan ammoniak reagere med salpetersyre, hvilket fører til dannelse af partikulært ammoniumnitrat:
  $NH_3 + HNO_3 \rightarrow NH_4NO_3$

Skematisk oversigt over stoffer

- Salpetersyre kan også reagere med andre partikler.
  En af de vigtigste reaktioner er reaktionen med saltholdige partikler, hvilket fører til dannelse af natriumnitrat ($NaNO_3$):
  $HNO_3 + NaCl \rightarrow NaNO_3 + HCl$
  og processer, der medfører udledninger af gasser (NH_3, NO, NO_2 og SO_2), som kan danne sekundære uorganiske partikler (NH_4NO_3, H_2SO_4 og $(NH_4)_2SO_4$).



stoffer på partiklerne er i sig selv giftige, fx polyaromatiske hydrocarboner (PAH), hvoraf mange vides med sikkerhed eller er mistænkt for at kunne give kræft.

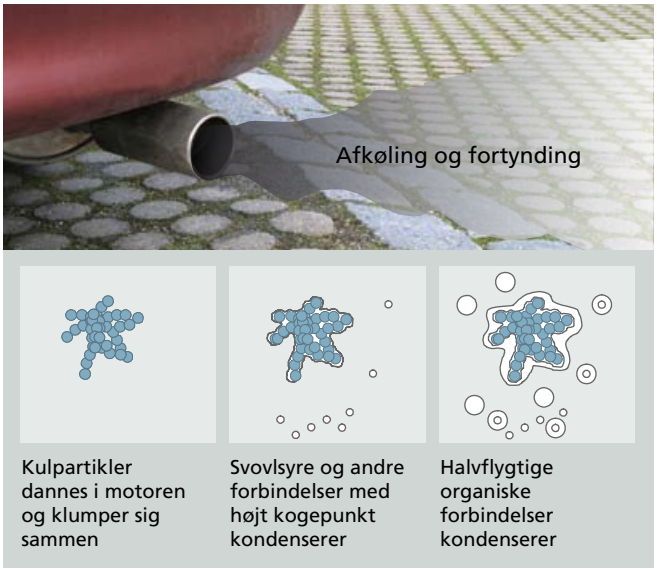
Sekundære partikler har den særlige egenskab, at de er vandsugende. I fugtig luft vokser de i størrelse, og de kan i store koncentrationer give anledning til en tågelignende nedsat sigtbarhed (tørdis).

Kondensation og nukleation

Forbrænding i fyrings- eller forbrændingsanlæg kan føre til dannelse af partikler, men partikler kan også dannes i skorstenen, hvor vand, fordampede organiske forbindelser, tungmetaller og metalforbindelser kondenserer (fortættes).

Udstødningsgasser fra biler kan også kondensere, når de bliver afkølet og blandet med luften efter udstødningsrøret (figur 2-5). Hvis luften er meget kold, kondenserer vanddampen i udstødningen, hvilket vi kan se som en synlig tåge. Udstødningsgasser fra biler kan indeholde forskellige partikler såsom halvflygtige stoffer, fx svovlforbindelser, rester af smøreolie og ufuldstændigt forbrændt dieselolie eller benzin.

Kondensationen af halvflygtige stoffer sker primært på overfladen af eksisterende partikler. Det samme gør sig gæl-

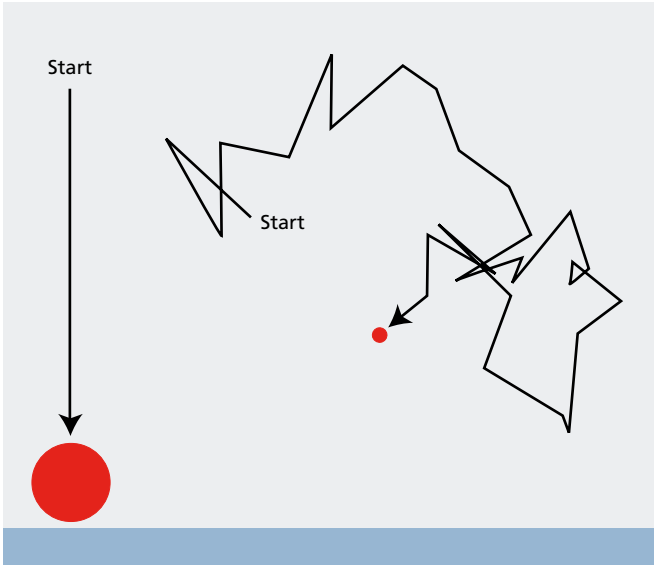


Figur 2-5
Små kulpartikler dannes under forbrændingen i dieselmotoren, hvor de klumper sammen til større sodpartikler. Under afkølingen i udstødningen fortætter forskellige halvflygtige forbindelser til væsker og faste stoffer, enten ved at kondensere på overfladen af eksisterende partikler (kondensation) eller ved at danne nye partikler (nukleation).
Foto: Britta Munter.

dende for luftarter, som ved kemiske reaktioner bliver omdannet til mindre flygtige forbindelser, der derefter kondenserer til sekundære partikler. I meget ren luft, hvor det samlede overfladeareal af partiklerne er lille, eller ved meget hurtig fortynding og afkøling, fx i udstødningen fra biler, vil en del af kondensationen ske ved nydannelse (nukleation) af meget små partikler – ofte i et enormt antal. Nukleation er en proces, som kan have meget stor betydning for antallet af partikler i luften, men som kun har ringe betydning for massen af partiklerne. Nukleationsprocesser er specielt vigtige i klimasammenhænge, fordi de nydannede partikler trods deres ringe størrelse kan virke som kondensationskim for vanddamp og derved forårsage skydannelse.

Partiklernes bevægelse i luft

Partikler kan holde sig svævende i luften i kortere eller længere tid, og de bliver spredt med vinden. Heldigvis foregår der en række fysiske processer, såsom sedimentation, diffusion og impaktion, som atter fjerner partiklerne fra atmosfæren (figur 2-6). Hvorvidt partiklerne hovedsageligt bliver fjernet fra luften ved sedimentation, diffusion eller impaktion, afhænger af partiklernes størrelse og beskrives i det følgende.



Figur 2-6
Partiklers bevægelse i atmosfæren i forhold til den omgivende luft. En stor partikel (t.v.) falder mod jorden på grund af tyngdekraften (sedimentation). En lille partikel (t.h.) bevæger sig tilfældigt, uafhængigt af tyngdekraften, på grund af sammenstød med luftens molekyler (diffusion).

Tabel 2-1
Kugleformede partiklers bevægelse på ét sekund i forhold til stillestående luft ved almindeligt atmosfæretryk (1 atm) for udvalgte diametre.
Kilde: DMU.

Diameter µm	Sedimentation[1)] µm	Diffusion µm
0,001	0,01	3.963
0,01	0,1	404
0,1	1	47
0,5	11	14
1	36	9
10	3.061	3
100	301.600	1

[1)] Massefylde antages at være 1 g pr. cm^3

Sedimentation og diffusion

Tabel 2-1 viser en beregning af, hvor langt kugleformede partikler ved almindeligt atmosfæretryk (1 atm) bevæger sig på ét sekund ved henholdsvis sedimentation og diffusion for nogle udvalgte diametre. Beregningerne er meget komplicerede og ligger uden for rammerne af denne bog, men vi har valgt at angive nogle tal for typiske partikler og normale atmosfæriske forhold.

Tabellen viser, at bevægelsen af en partikel, der er meget større end 0,5 µm (0,0005 mm) i diameter, er domineret af tyngdekraften. Faldhastigheden vokser kraftigt med størrelsen af partiklen. Hvis man ønsker at beregne faldhastigheden for partikler med diametre mellem de angivne værdier, kan man benytte sig af, at hastigheden, hvormed partiklerne falder, ca. vokser med diameteren i 2. potens. Faldhastigheden afhænger imidlertid også af andre faktorer, bl.a. af partiklens massefylde, men i tabel 2-1 har vi valgt at regne med en massefylde på 1 g pr. cm^3. Tunge kugleformede partikler falder naturligvis hurtigere end lette partikler med samme geometriske diameter. Hvis vi har to partikler, der falder lige hurtigt, siger vi, at de har samme aerodynamiske diameter.

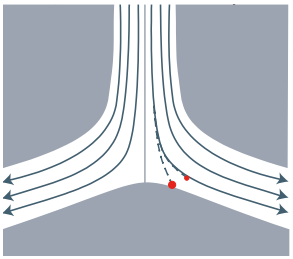
Ved diffusion kan man ikke tale om en hastighed, da partiklens bevægelse foregår i en tilfældig retning. Tallene i tabel 2-1 angiver derfor, hvor langt en partikel sandsynligvis vil drive bort fra begyndelsesstedet i løbet af ét sekund. Partiklernes drift ved diffusion foregår, som det fremgår af figur 2-6, ikke i en lige linje men via sammenstød med molekylerne i luften gennem mange lige linjestykker. Derfor er

driften ikke dobbelt så lang på den dobbelte tid, men på n sekunder vil diffusionen drive partiklen kvadratroden af n gange længere væk i forhold til luften. På 100 sekunder vil en partikel med en diameter på fx 0,001 µm drive $3.963*\sqrt{100}$ µm = 39.630 µm væk fra begyndelsesstedet. Bevægelse ved diffusion dominerer for partikler, der er væsentligt mindre end 0,5 µm i diameter, og for de ultrafine partikler (diameter < 0,1 µm) bliver diffusionen tilnærmelsesvis forøget omvendt proportionalt med diameteren. For ultrafine partikler er det kun mobiliteten, der er et mål for luftmodstanden under bevægelse, som har en betydning for bevægelsen, mens massefylden ikke spiller nogen rolle.

Størrelsen af ikke-kugleformede ultrafine partikler angives per definition som diameteren af en kugleformet oliedråbe med samme mobilitet (eller diffusion) som partiklen.

Impaktion

Partikler kan også blive fjernet fra luften ved impaktion. Impaktion af partikler kan ske, når luft i bevægelse bliver tvunget til at bremse eller ændre retning. Partikler, der er tilstrækkeligt store (tunge), vil herved forlade luftstrømmen på grund af deres inerti (tunge legemers tilbøjelighed til at fortsætte med uændret hastighed) og blive afsat på forskellige overflader. Denne proces er vist skematisk i figur 2-7, hvor den store partikel forlader luftstrømmen og rammer en overflade, mens den lille partikel fortsætter med luftstrømmen. To partikler, der har samme aerodynamiske diameter, vil ligesom ved sedimentation opføre sig ens ved afsætning på grund af impaktion.



Figur 2-7
Impaktion af partikler ved en forgrening af en luftstrøm, fx i bronkierne ved indånding. Den store partikel forlader luftstrømmen og rammer overfladen, mens den lille partikel fortsætter.

Hvor længe opholder partikler sig i atmosfæren?

Der er stor forskel på, hvor længe partikler opholder sig i atmosfæren. Meget store og meget små partikler forsvinder hurtigt fra atmosfæren. Store partikler forsvinder fra atmosfæren, fordi de hurtigt falder til jorden ved sedimentation, eller fordi de let bliver indfanget af faldende regndråber ved impaktion. Meget små partikler forsvinder derimod fra atmosfæren, fordi diffusionen får dem til ramme hinanden eller får dem til at ramme overfladen på store partikler og andre overflader. Herved klistrer partiklerne samme, så antallet af de mindste partikler hurtigt bliver reduceret.

Store partikler med en aerodynamisk diameter på 100 µm, fx partikler i ophvirvlet vejstøv, falder jf. tabel 2-1 med en hastighed på 301.600 µm pr. sekund, hvilket svarer til 0,30 meter pr. sekund. Store partikler falder altså hurtigt til jorden. En partikel med en aerodynamisk diameter på 10 µm falder væsentligt langsommere (3.061 µm pr. sekund = 3,1 millimeter pr. sekund = 11 meter pr. time). Hvis en ophvirvlet partikel med en diameter på 10 µm føres bort med vinden, vil den på trods af den lave faldhastighed med stor sandsynlighed falde til jorden inden for den første time.

Partikler med en aerodynamisk diameter på 1 µm kan derimod holde sig svævende i ugevis (faldhastigheden er 36 µm pr. sekund = 0,036 millimeter pr. sekund = 3,1 meter pr. døgn). Partikler i hele størrelsesområdet 0,1 µm - 1 µm har en lang levetid i atmosfæren. De kan føres tusindvis af kilometer med vinden, hvis de ikke bliver udvasket undervejs på grund af regn.

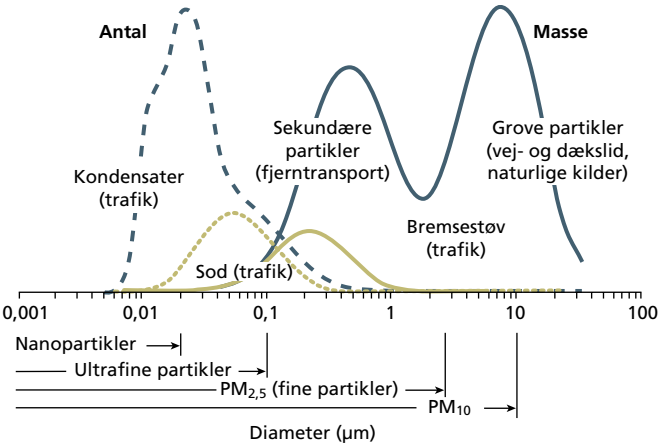
Partiklers størrelsesfordeling

Det er i mange sammenhænge nødvendigt at se på størrelsen af partiklerne, da størrelsen har stor betydning for partiklernes bevægelse, hvor længe de opholder sig i atmosfæren, hvor stor risikoen er, for at vi indånder dem, og hvor de afsættes i vores luftveje.

Hvis vi ønsker at måle den samlede masse af partikler fx i en trafikeret gade, afhænger massen af, hvor store partikler vi opsamler. De helt store partikler holder sig kun svævende i luften i kort tid, idet de hvirvles op af trafikken og falder ned igen kort efter. De er vanskelige at opsamle med et måleapparat, men risikoen, for at vi indånder dem, er også mindre sammenlignet med fine partikler. Hvilke partikler, der bliver opsamlet, er også stærkt påvirket af tilfældigheder, fx vindhastigheden.

Vi kan foretage en forholdsvis veldefineret måling af partiklernes masse, hvis vi ved selve opsamlingen sørger for at afskære partikler, der er større end henholdsvis 10 µm (PM_{10}) og 2,5 µm ($PM_{2,5}$). PM betyder *Particulate Matter*, hvilket på dansk bedst kan oversættes med partikelmasse. PM_{10} består dels af fine partikler, dels af en del af de grove partikler, mens $PM_{2,5}$ udelukkende består af fine partikler.

For at beskrive partiklerne tilstrækkeligt er det nødven-



Figur 2-8
Typisk størrelsesfordeling af partikler på en trafikeret gade. Bemærk at aksen er logaritmisk. $PM_{2,5}$ og PM_{10} er massen af partiklerne under henholdsvis 2,5 µm og 10 µm. De stiplede kurver viser fordelingen af partiklerne målt som antal. De fuldt optrukne kurver viser den samme fordeling målt som masse. Sodpartiklerne fra trafikken (lys farve) har betydning for både den totale partikelmasse og det totale partikelantal.
Kilde: DMU.

digt at supplere massemålingerne med en tælling af partiklerne, da massen af partiklerne vokser kraftigt med størrelsen. En kugleformet partikel med en diameter på 10 µm vejer fx 1.000 gange så meget som en kugleformet partikel med en diameter på 1 µm, en million gange så meget som en partikel med en diameter på 0,1 µm og en milliard gange så meget som en partikel med en diameter på 0,01 µm, hvis vi forudsætter, at massefylden er den samme. Når vi undersøger, hvordan partiklerne i luften fordeler sig efter størrelse, får vi derfor helt forskellige billeder afhængigt af, om vi undersøger fordelingen af partiklernes masse, eller om vi undersøger fordelingen af deres antal. Dette ses klart af kurverne på figur 2-8, der viser en typisk størrelsesfordeling af partikler på en trafikeret gade. De stiplede kurver viser fordelingen af partiklerne målt som antallet af partikler, mens de fuldt optrukne kurver viser den samme fordeling målt som massen af partikler. Partikeldiameteren 0,1 µm er et karakteristisk skillepunkt mellem de to måder at betragte fordelingen af partikler på, idet langt det meste af massen skyldes partikler, der er større end 0,1 µm, mens langt de fleste partikler er ultrafine partikler, der er mindre end 0,1 µm. De ultrafine partikler er altså specielle ved, at de betyder næsten alt for det totale antal partikler, mens de næsten ingen betydning har for den totale masse af partiklerne.

I en trafikeret gade er det totale antal partikler domineret af partikler fra udstødning fra især dieselbiler, dels af meget små kondenserede brændstof- eller oliedråber, og

dels af faste sodpartikler med en diameter omkring 0,1 µm. Som det ses af figur 2-8, er massen af kondensaterne meget lille. Ikke desto mindre udgør kondensaterne en meget stor andel af det samlede antal partikler. Sodpartikler ses både i partikelmassen og i partikelantallet. Det skyldes, at de fleste sodpartikler er mindre end 0,1 µm i diameter, mens det meste af sodpartiklernes masse findes i partikler, der er større end 0,1 µm i diameter.

Når partiklerne fra bilerne bliver spredt væk fra gaderummet og ud til andre dele af byen, forsvinder de mindste kondensatpartikler hurtigt på grund af diffusion. Det vil sige, at de enten bliver afsat på forskellige overflader eller klumper sammen til større partikler. De faste sodpartikler har derimod en meget længere levetid.

Figur 2-8 viser, at de grove partikler især stammer fra mekaniske processer, hvor stof bliver findelt eller hvirvlet op. Det meste af massen af de grove partikler, som man kan måle i en gade, kommer fra gaden selv. En lille del af massen af grove partikler kan være langtransporteret, fx havsalt og ørkenstøv.

De fine partikler stammer især fra forbrændingsprocesser. Ved forbrænding dannes meget fine partikler, fx sod og forskellige luftarter, som under transporten i atmosfæren efterhånden bliver omdannet til de større sekundære partikler, der udgør hovedparten af de fine partikler. Kun en mindre del af den fine partikelmasse i en gade kommer fra gadens trafik.

Partikler fra skivebremser, som også er vist i figur 2-8, er omkring 3 µm i diameter. De ligger altså på grænsen mellem de fine og grove partikler. Deres bidrag til den samlede masse af partikler er forholdsvis beskeden, men det er relevant at se på disse partikler, da de til gengæld indeholder en del tungmetaller, som man anser for særligt sundhedsskadelige.

Måleteknikker

Vi kan måle partikler ved hjælp af deres egenskaber, fx deres masse, mobilitet, aerodynamiske diameter, antal, farve, kemiske sammensætning osv. Hvilken målemetode, vi vælger, afhænger af formålet med vores målinger. Til forskningsopgaver anvender vi de metoder, der bedst beskriver de

Luftmålestationen på H. C. Andersens Boulevard har klimaanlæg, som sikrer, at måleinstrumenterne fungerer optimalt. På taget af målestationen ses luftindtag, herunder PM_{10}-hoveder, som sikrer en veldefineret prøve-tagning af partikler.
Foto: DMU.

egenskaber ved partiklerne, vi ønsker at studere. Overvågning af partikelforurening i Europa sker ved hjælp af nogle standardmetoder, som vi vil beskrive nærmere i det følgende.

Filtermetoder

Den metode, vi hyppigst anvender til måling af partikler, er en filtermetode, hvor vi først opsamler en partikelprøve på et filter, som vi derefter vejer. Hvis vi vejer filteret før og efter opsamlingen af partiklerne, kan vi bestemme massen af partiklerne. Mange filtre og partikeltyper optager imidlertid vand fra luften. For at få præcise målinger er det derfor nødvendigt, at filteret har samme temperatur og fugtighed før de to vejninger.

Partiklerne bliver afsat på filteret ved forskellige fysiske processer alt afhængigt af størrelsen på partiklerne. Når vi indånder partikler, bliver de afsat i vores luftvejene ved de samme fysiske processer, som gør sig gældende for et filter.

Partikler, der har en aerodynamisk diameter større end 0,5 µm, bliver primært afsat på filteret ved impaktion. Hvis partiklerne er meget store, kan filteret virke som en si, idet åbningerne i filteret er for små til, at partiklerne kan passere. Hvis partiklerne er mindre end 0,5 µm i diameter, får diffusionen hurtigt en stor betydning for afsætningen af partiklerne. Dette er årsagen til, at filtre har den laveste effektivitet for partikler omkring 0,5 µm, mens filtrene virker bedre (op mod 100 % effektivitet), når vi vil måle mindre og større partikler.

Når vi har opsamlet en partikelprøve på et filter, kan vi efterfølgende analysere indholdet af kemiske stoffer i partikelprøven, og dermed har vi mulighed for at relatere den til partiklernes kilder eller deres helbredseffekter. Tabel 2-2 viser en oversigt over de vigtigste typer af partikler, kilderne til disse samt en oversigt over sundhedsskadelige indholdsstoffer.

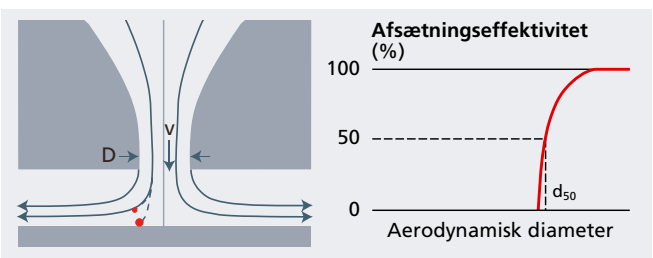
Tabel 2-2
Oversigt over de vigtigste typer af partikler og deres kilder og indholdsstoffer.

Partikeltype	Kilde	Indhold
Primære partikler	Afbrænding af biomasse (fx brændeovne, brændekedler og skovbrande)	Kulstof (sod), salte, organiske stoffer (fx sukkerstoffer, dioxin og PAH)
	Dieselmotorer (fx vejtrafik, traktorer, entreprenørmaskiner og skibe)	Kulstof (sod), salte (aske fra smøreolie), organiske stoffer (fx PAH)
	Slid af dæk (vejtrafik)	Gummi, hjælpestoffer (fx zink og svovl)
	Slid på vejbelægning og ophvirvling af støv (vejtrafik)	Mineraler (jordstoffer) og bitumen
	Slid af bremser (vejtrafik)	Jern, kobber og tungmetaller
	Forbrænding af kul og tunge olier (fx kraftværker og skibe)	Kulstof (sod), mineraler (aske), tungmetaller (fx kviksølv og bly) og organiske stoffer (fx PAH)
	Havet (havsprøjt)	Salte (med indhold af natrium, magnesium, klor, svovl og brom)
	Jordoverflader (marker, ørkner)	Mineraler
Sekundære partikler	Gasser udledt fra forbrændingsprocesser (fx vejtrafik, kraftværker og industri), naturlige kilder (fx vegetation)	Uorganiske stoffer (fx med indhold af ammonium, nitrat, sulfat og klorid) og organiske stoffer (fx organiske syrer og komplicerede organiske forbindelser)

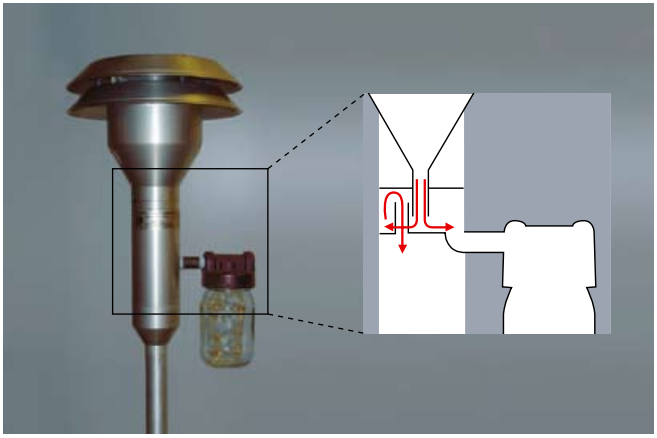
Når vi vejer et filter, får vi ikke et øjebliksbillede ("online") af koncentrationen af partiklerne, da de bliver opsamlet på filteret over en tidsperiode. Derfor har man udviklet forskellige automatiske metoder, der kan give os et bedre billede af koncentrationen af partiklerne. En af metoderne går ud på at måle svækkelse af radioaktiv stråling (betastråling) i filteret efterhånden, som partiklerne bliver opsamlet. En anden og meget udbredt metode går ud på at måle ændringen i frekvensen på et meget tyndt glasrør, hvorpå der er monteret et filter, som partiklerne bliver opsamlet på. Hvad enten man bruger den ene eller anden metode, kan der ske tab af stof fra partikelprøven, bl.a. fordi man opvarmer filteret for at få stabile og sammenlignelige resultater. Ved denne opvarmning risikerer man, at de flygtige partikler forsvinder fra filteret.

Impaktorer

I en impaktor udnytter vi impaktionsprincippet, når vi opsamler partikler i apparatet (figur 2-9). Man retter en snæver luftstrøm fra en smal dyse mod en klæbrig plade, hvor partikler med en tilstrækkelig stor aerodynamisk diameter bliver afsat. Da lufthastigheden af luftstrømmen er størst i midten, skal de partikler, som befinder sig nærmere væggene, have en lidt større aerodynamisk diameter end partiklerne i midten af luftstrømmen, for at de netop bliver afsat. Derfor er det ikke muligt at lave en helt præcis afskæring af en bestemt størrelse af partikler. Grafen i figur 2-9 viser opsamlingseffektivitet som funktion af partikelstørrelsen. Impaktorens karakteristiske afskæringsdiameter (d_{50}) defineres ved, at netop halvdelen af partiklerne med den ønskede diameter bliver opsamlet (50 %'s effektivitet).

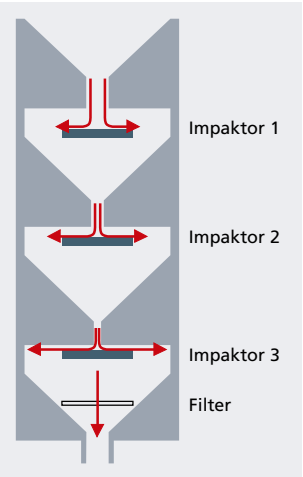


Figur 2-9
Skematisk tegning af en impaktor. En snæver luftstrøm med hastigheden v fra en dyse med bredden (eller diameteren) D rettes mod en plade. Det kan være nødvendigt at smøre pladen med et klæbrigt eller fedtet stof, for at partikler skal blive siddende. Grafen til højre viser, hvorledes de fleste af partiklerne, som er større end d_{50}, bliver afsat på pladen. Man kan beregne størrelsen af d_{50} tilnærmelsesvis, hvis man kender D og v.



Figur 2-10
Fotoet viser et såkaldt PM_{10}-hoved. Partikler, som er større end 10 µm, afsættes i en impaktor, som er vist skematisk i udsnittet til højre. Vanddråber, fx fra tåge, er langt større end 10 µm, og de vil derfor også blive opsamlet af impaktoren, hvorefter de løber ned i flasken.
Foto: Peter Wåhlin.

Et PM_{10}-hoved (figur 2- 10) er egentlig en impaktor med d_{50} = 10 µm, men formålet med et PM_{10}-hoved er det modsatte af opsamling. Ofte er vi kun interesseret i at måle partikler under en vis størrelse, fx PM_{10} eller $PM_{2,5}$. For at opnå dette kan vi sætte et såkaldt PM_{10}- eller $PM_{2,5}$-hoved foran måleapparatet. Figur 2-10 viser et PM_{10}-hoved, hvor princippet i selve PM_{10}-hovedet er tegnet skematisk. Partiklerne kommer ned igennem en dyse i midten. Partikler, der er større end 10 µm, bliver afsat på pladen ved impaktion. Partikler, der er mindre end 10 µm, fortsætter med luftstrømmen gennem afgangsrørene (der ses kun et på tegningen) og opsamles på et filter eller et partikelmåleinstrument, som er placeret under PM_{10}-hovedet (ikke vist på figuren). Det er vigtigt, at præcis halvdelen af de partikler, der har en aerodynamiske diameter på netop 10 µm, bliver afsat i PM_{10}-hovedet. For at opnå dette skal luftstrømmen fastholdes på en bestemt hastighed. Vanddråber fra tåge og regn bliver afsat sammen med de store partikler og løber ned i glasset.



Figur 2-11
Skematisk tegning af en kaskadeimpaktor, der opdeler partiklerne i fire størrelsesfraktioner. Partiklerne afsættes i aftagende størrelser på plader i de tre impakttrin. De fineste partikler opsamles på filteret.

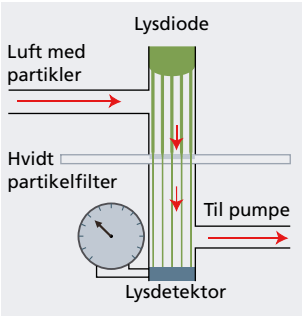
Vi kan opsamle partikler i forskellige størrelser ved hjælp af en såkaldt kaskadeimpaktor, hvor en række impaktorer er anbragt efter hinanden med aftagende afskæringsdiametre (figur 2-11). De allerfineste partikler bliver opsamlet med et filter til sidst. Vi kan justere afskæringsdiameteren ved at ændre diameteren på dysen (D) og hastigheden af luftstrømmen (v), idet d_{50} vokser med kvadratroden af D og falder med kvadratroden af v.

Partikeltællinger

Det er vanskeligt at måle massen af meget små partikler, og det er derfor nødvendigt i stedet at måle deres antal. Når vi måler antallet af partikler, foregår det typisk ved at se på spredningen af lys fra en laserstråle i en såkaldt kondensationspartikeltæller. Hvis partiklerne er meget mindre end lysets bølgelængde, kan laserstrålen ikke "se" partiklerne. Derfor benytter vi os af, at vi kan få fx vanddamp til at kondensere på partiklerne, hvormed partiklerne vokser så meget i størrelse, at vi kan registrere dem. Hvis vi kombinerer denne teknik med en sortering efter partiklernes mobilitet, kan vi bestemme størrelsesfordelingen af meget små partikler, se boks 2-3.

Sodmåling

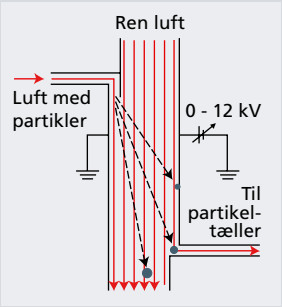
Man formoder, at sodpartikler, der er dannet ved forbrænding, er særligt skadelige. Derfor har man udviklet metoder til at bestemme mængden af partikler, der indeholder kulstof (sod). Man kan bestemme mængden af sodpartikler ved en meget simpel metode, hvor man måler sværtningen af et filter med opsamlede partikler (figur 2-12).



Figur 2-12
Sodmåler. Når filteret sværtes, falder signalet fra lysdetektoren. Analyseres ændringen af signalet, kan koncentrationen af lysabsorberende stof i luften bestemmes som funktion af tiden. Flyttes eller drejes filteret, inden pletten bliver helt sort, startes forfra på en ny plet.

Boks 2-3

Størrelsesfordeling af partikler



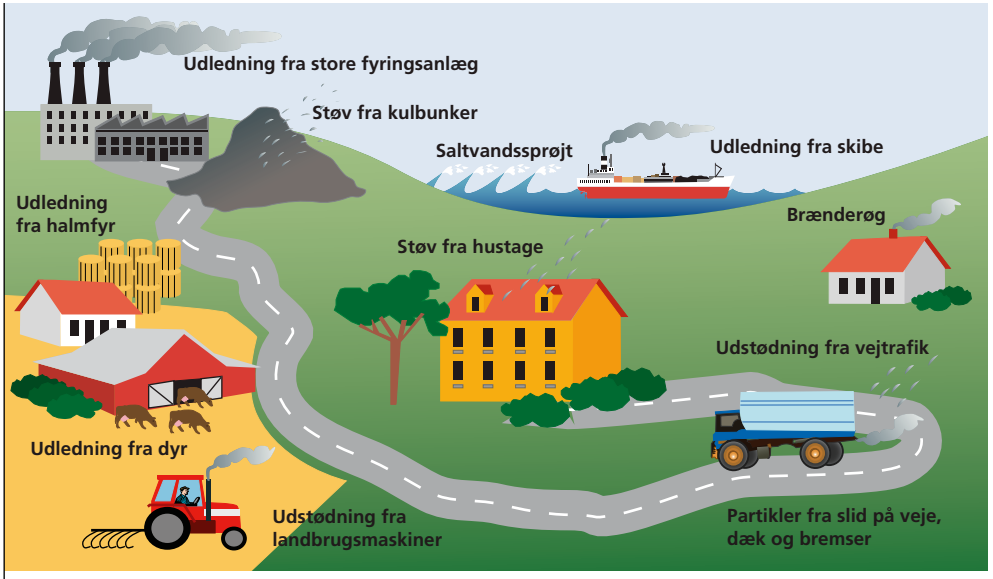
Figuren viser et apparat, der kan måle størrelsesfordelingen af partikler. Luften med partikler kommer ind øverst til venstre. Her møder den en strøm af ren partikelfri luft, som den følges med nedad, uden at de to typer af luft bliver blandet. En lige så stor del af den rene luft tages ud nederst til højre.

Partikler med en negativ elektrisk ladning bliver trukket ind i den rene luft ved hjælp af en pålagt elektrisk spænding, som er vist på figuren. I forvejen har man stabiliseret ladningsfordelingen på partiklerne. Små partikler (stor mobilitet) bevæger sig hurtigt og sætter sig fast på den modsatte side. Store partikler (lille mobilitet) fortsætter med luftstrømmen forneden. Partikler med den ønskede mobilitet følger med luften ud til højre og måles med en partikeltæller. Man foretager en skanning af den elektriske mobilitet (mobiliteten gange partiklens elektriske ladning) ved at måle ved en række forskellige spændinger. Til slut foretager man en beregning af størrelsesfordelingen på grundlag af partiklernes elektriske ladningsfordeling, som kendes teoretisk som funktion af partikeldiameteren.

3 Udledning af partikler

Når vi vil kontrollere og regulere forureningen med partikler, er det en vigtig forudsætning, at vi har et overblik over, hvor partiklerne kommer fra, hvor meget de enkelte sektorer eller kilder bidrager til udledningen, samt hvilken betydning de har for den lokale og regionale luftforurening.

Foto: Lars Sundshøj/DONG Energy.



Figur 3-1
Kilder til udledninger af partikler er bl.a. biler, brænderøg fra beboelse, landbrug (støv fra dyr og maskiner), halmfyr, kulbunker, jord og havsprøjt.

Opgørelse af udledninger

Alle europæiske lande og mange uden for Europa har forpligtet sig til at kortlægge og rapportere deres udledninger (emissioner) af forskellige luftforurenende stoffer – herunder udledninger af partikler samt stoffer, der kan danne partikler. De enkelte lande skal årligt afrapportere opgørelser over deres udledninger til EU og Konventionen om Grænseoverskridende Luftforurening (LRTAP) under De forenede Nationers Økonomiske Kommission for Europa (UNECE) (se tabel 3-1). Dette sker bl.a. for at kontrollere, om de enkelte lande overholder de emissionslofter eller krav til reduktion, som EU har fastsat (se kapitel 6). Opgørelserne bliver ligeledes anvendt i modeller, der bliver brugt til at beregne transport, deposition og koncentrationen af

Tabel 3-1
Liste over partikler og stoffer, der kan danne partikler, for hvilke alle lande i Europa skal beregne de årlige udledninger og rapportere disse til EU og Konventionen for Grænseoverskridende Luftforurening.

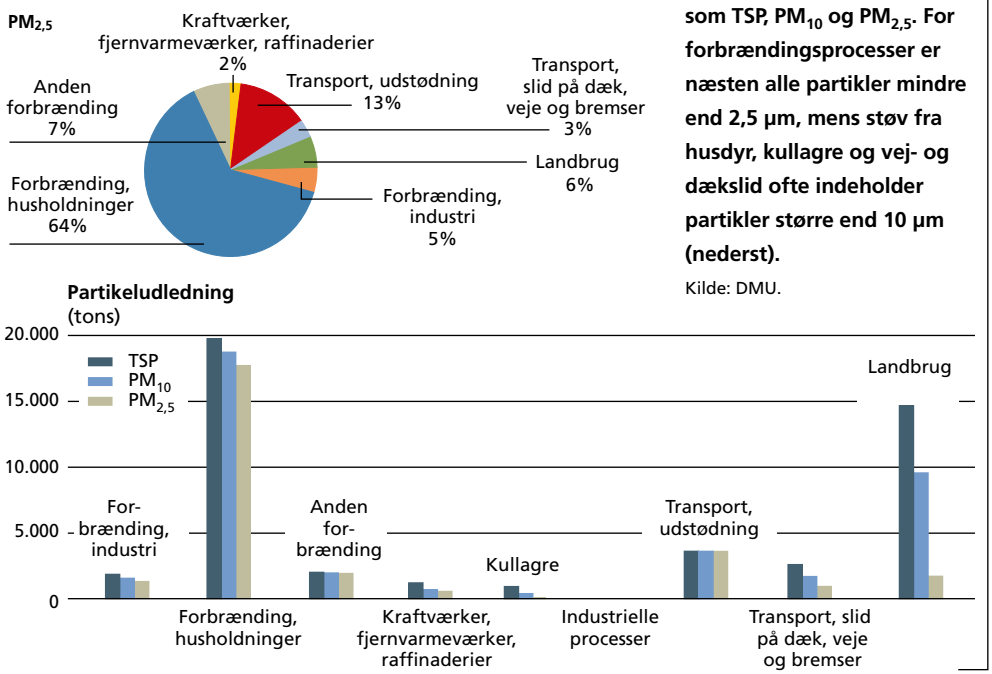
Stoffer
Samlede mængde af partikler (Total Suspended Particulates, TSP)
PM_{10}
$PM_{2,5}$
Svovldioxid (SO_2)
Kvælstofoxider (NO_x)
Ammoniak (NH_3)
Kulbrinter

partikler. Det er oftest kun menneskeskabte partikler og andre forureninger, de enkelte lande opgør, da det er dem, vi har mulighed for at regulere. I dette kapitel har vi lagt vægt på udledningen af disse partikler.

Udledning af primære menneskeskabte partikler

Sammenlignet med andre typer af partikler har udledningen af primære menneskeskabte partikler en stor miljømæssig betydning både nationalt og lokalt. Vi har derfor valgt at fokusere på de udledninger, der finder sted i Danmark.

Figur 3-2 viser, at de vigtigste kilder til udledning af primære partikler er husholdninger, transport, landbrug og industri. Forbrændingsprocesser er hovedansvarlige for udledningen af partikler under 2,5 µm. Kilderne hertil er forbrændingsanlæg i kraftværker, industrivirksomheder og husholdninger (herunder brændeovne) samt forbrændingsmotorer i biler, tog, fly, skibe og landbrugsredskaber. Kilder til partikler større end 2,5 µm er støvpartikler fra landbrug samt slid på veje, dæk og bremser.



Figur 3-2
Udledning af primære partikler ($PM_{2,5}$) i 2005 i Danmark fra forskellige kilder (øverst).
Udledning af primære partikler i 2005 i Danmark fra forskellige kilder angivet som TSP, PM_{10} og $PM_{2,5}$. For forbrændingsprocesser er næsten alle partikler mindre end 2,5 µm, mens støv fra husdyr, kullagre og vej- og dækslid ofte indeholder partikler større end 10 µm (nederst).
Kilde: DMU.

Da det er umuligt at foretage målinger på alle kilder, er langt hovedparten af udledningerne beregnet ud fra aktivitetsdata, fx forbrugt træ pr. år, og udledningsfaktorer, fx gram partikler pr. kilo træ. Endvidere er opgørelserne af udledninger af partikler generelt usikre. Det skyldes bl.a., at vi for nogle kilder kun har få målinger af udledningerne, og at de anvendte teknologier giver anledning til meget forskellige udledninger. Endelig kan anvendelsespraksis, fx hvordan vi fyrer i en brændeovn, også have stor indflydelse på mængden af partikler, der udledes.

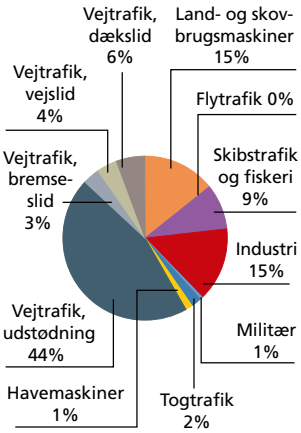
Tabel 3-2 viser, at der er store forskelle i udledningerne af partikler fra forskellige typer af brændsler og anlæg. Brændeovne og små kedler forurener meget mere end oliefyr og kraft-varme-værker, der anvender træ eller kul. Udledningerne per energienhed for træfyrede anlæg i husholdninger er ca. 600 gange større end kraft-varme-værker, der anvender træ og ca. 250 gange større end kraftværker, der anvender kul. Generelt er forbrændingen bedre på anlæg, der er automatisk reguleret med hensyn til lufttilførsel og temperatur. Store anlæg har normalt også en relativt mindre udledning af partikler, da forbrændingstemperaturen er højere end i små anlæg. Desuden er store anlæg, såsom kraftværker og kraft-varme-værker, reguleret effektivt af miljømyndighederne.

Tabel 3-2
Brændselsforbrug, udledningsfaktorer og udledninger af partikler fra forskellige forbrændingsanlæg i 2005 i Danmark. Brændselsforbruget er angivet i gigajoule (GJ), mens udledningsfaktorerne er angivet i gram pr. gigajoule. Den store udledning af partikler fra husholdninger skyldes hovedsageligt fyring med træ i brændeovne og små brændekedler, der har meget større udledningsfaktorer end små forbrændingsanlæg samt kraft- og kraftvarme-værker.
Kilde: DMU.

Anlæg	Brændsels-forbrug (10^6 GJ)	Udlednings-faktor for $PM_{2,5}$ (g pr. GJ)	Udledning (tons)
Forbrændingsanlæg i husholdninger			
Brændeovne og kedler	25	672,0	16.885
Oliefyr	24	5,0	120
Naturgasfyr	30	0,1	3
Kraft- og kraft-varme-værker			
Kulfyrede kraftværker	144	2,1	303
Kraft-varme-værker, forbrænding af træ	13	1,2	15
Kraft-varme-værker, forbrænding af affald	33	1,1	36

Udstødningen fra vejtrafikken bidrager med næsten halvdelen af udledningen fra mobile kilder (figur 3-3). Hvis vi medregner støv fra slid på veje, dæk og bremser, udgør den samlede vejtrafik næsten 60 % af udledningen af partikler fra mobile kilder. Den næststørste kilde er udstødning fra landbrugsmaskiner, hvor især traktorer og mejetærskere bidrager til udledningen. For industrien er det især grave- og læssemaskiner i bygge- og anlægssektoren samt gaffeltrucks, der giver store udledninger af partikler. Udledningerne fra den internationale skibstrafik er ikke vist på figuren, men den er ca. ti gange større end de samlede udledninger fra den nationale skibstrafik og fiskeri.

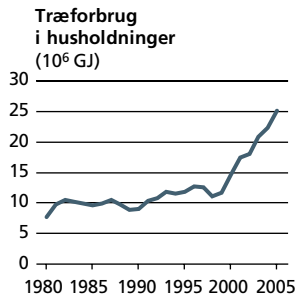
Som illustreret i figur 3-2 er langt de vigtigste kilder til udledning af $PM_{2,5}$ i Danmark husholdningers fyring med træ og vejtrafik. Disse to kilder vil derfor blive nærmere belyst i det følgende.



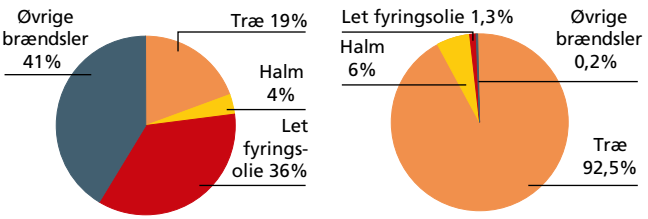
Figur 3-3
Transportsektorens og andre mobile kilders udledninger fordelt på kilder til $PM_{2,5}$ i 2005 i Danmark. De største kilder er udstødning fra vejtrafik, landbrugsmaskiner og industrimaskiner, fx gaffeltrucks.
Kilde: DMU.

Husholdningers fyring med træ

Siden 1970'erne er anvendelse af træ til fyring i husholdninger steget kraftigt. Denne udvikling er fortsat de seneste år, hvor forbruget er steget med omkring 70 % fra 1999 til 2005 (figur 3-4). Også i fremtiden forventer man, at træforbruget i husholdningerne vil stige – fra 2000 til 2030 forventes en fordobling.



Figur 3-4
Udvikling i træforbrug til fyring i Danmark. Stigningen i fyringen med træ er ca. 200 % fra 1980 til 2005.
Kilde: Energistyrelsen.
Foto: Britta Munter.

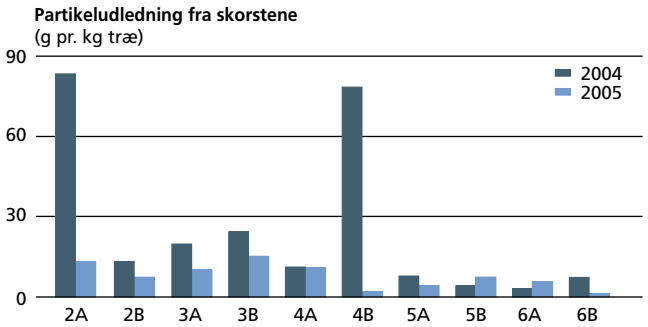


Figur 3-5
Sammenligning af brændselsforbrug (t.v.) og udledninger af $PM_{2,5}$ (t.h.) for de forskellige typer af brændsler, der anvendes i husholdninger i Danmark. Selvom træ kun udgør omkring 20 % af husholdningernes brændselsforbrug, kommer 93 % af partiklerne fra fyring med træ.
Kilde: DMU.

Hvis man isoleret betragter udledningen af drivhusgasser, er det selvfølgelig en fordel at anvende træ, da træ er en fornybar energikilde. Man omtaler ofte brændefyring som værende CO_2-neutral. Her skal det dog bemærkes, at dyrkning af skov samt transport og bearbejdning af træ normalt giver anledning til udledninger af CO_2. Desuden giver afbrænding af træ anledning til en betydelig partikelforurening. Også udledningerne af dioxiner og PAH'er er store fra brændeovne og små kedler.

Kun omkring 20 % af husholdningers brug af brændsler er træ, men mere end 90 % af partikeludledningen stammer fra træ (figur 3-5). Denne store udledning af partikler fra fyring med træ kan i visse beboelsesområder forårsage en betydelig luftforurening.

Figur 3-6 illustrerer, at den høje udledningsfaktor fra brændeovne og små kedler jf. tabel 3-2 dækker over meget store variationer af udledninger fra hus til hus og fra tidspunkt til tidspunkt. Udledningsfaktorerne ligger mellem 0,1 - 83 g pr. kg træ. Undersøgelserne tyder på, at det er forholdsvis få brugere af brændeovne eller små kedler, der forurener særligt meget og på den måde bidrager til en stor del af den samlede forurening.



Figur 3-6
Målte udledninger af partikler fra skorstene i et beboelseskvarter med brændeovne og små brændekedler. Partikeludledningerne varierer meget fra hus til hus og i tid. Betegnelserne på den vandrette akse henviser til korte målekampagner i de enkelte huse.
Kilde: DMU.

		Træforbrug i %	Udledning af $PM_{2,5}$
Brændeovne	Gamle ovne	41,7	61,3
	Moderne ovne	8,3	7,2
Små brændekedler	Gamle kedler med akkumuleringstank	8,5	11,4
	Gamle kedler uden akkumuleringstank	5,6	15,1
	Nye kedler	14,2	4
	Pillekedler	21,6	1

Tabel 3-3
Træforbrug og udledning af partikler fordelt på brændeovne og små brændekedler i Danmark. Nye ovne og kedler er mere miljøvenlige end gamle. Pillekedler forurener langt mindre end anlægstyper, der anvender brændestykker. Selvom 22 % af brændeforbruget er træpiller, udgør de kun 1 % af udledningen af $PM_{2,5}$.
Kilde: DMU.

	Reduktion i udledning (g PM_{TSP} pr. GJ)
Moderne brændeovne	640
Masseovne	200
Træpilleovne	60
Efterbrændere i gamle ovne	330
Brændeovne med elektrostatiske filtre	55
Træpillebrændere monteret på gamle kedler	100
Nye brændekedler med akkumuleringstanke	150
Nye træpillekedler	35

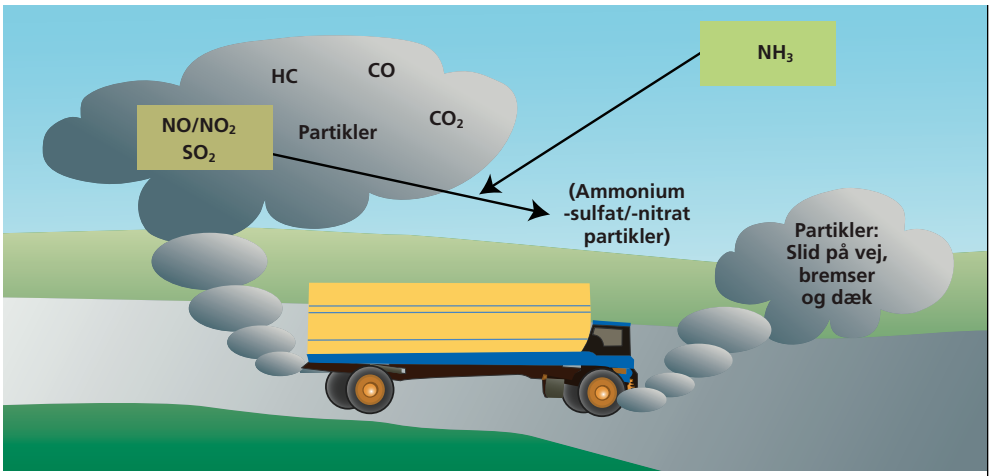
Tabel 3-4
Potentialer for at reducere udledningen af partikler fra brændeovne og små brændekedler. Store reduktioner i udledningerne af partikler kan opnås ved at udskifte gamle ovne og kedler med teknologier, der enten automatisk styrer forbrændingen eller akkumulerer varmen. Der er også et reduktionspotentiale i at montere partikelfiltre på toppen af skorstene.
Foto: Finn Palmgren.

Nabogener fra skorstensrøg afhænger i høj grad af, om der fyres korrekt, og om der anvendes gode brændeovne og kedler. Tabel 3-3 viser fordelingen af de forskellige typer af brændeovne og kedler, der anvendes i Danmark, og de udledninger, de giver anledning til.

Det er specielt gamle kedler, der forurener meget, mens nyere brændeovne og små kedler generelt udleder færre partikler. Kedler eller brændeovne, der har en automatisk regulering af lufttilførsel og indfødning af træ, forurener markant mindre.

Ændringer i vores fyringsvaner og udskiftning af gamle kedler og ovne kan betyde et stort fald i udledningerne af partikler. I tabel 3-4 er listet forskellige typer af teknologier, der giver mulighed for at nedbringe forureningen. Masseovne og elektrostatiske filtre er to eksempler på teknologier, der kan nedbringe forureningen (figur 3-7). Masseovne akkumulerer varmen i en massiv stenmasse, og det er derfor muligt at fyre intensivt ved en høj forbrændingstemperatur og derved undgå dannelse og udledning af partikler. Elektrostatiske filtre fjerner de partikler, der bliver dannet under forbrændingen.

Figur 3-7
Masseovne, der er en gammel teknologi, akkumulerer varmen i en massiv stenmasse. Det er derfor muligt at fyre intensivt ved en høj forbrændingstemperatur, og derved undgå dannelse og udledning af partikler (t.v.).
Foto: Fornyetenergi.
Elektrostatiske filtre kan fjerne partikler, der er dannet og ellers vil blive udledt gennem skorstenen. Teknologien er endnu ikke kommercielt tilgængelig, men der er forsøg i gang, hvor filtrene testes på skorstene i danske beboelsesområder (t.h.).
Indsatte fotos: Applied Plasma Physics AS.



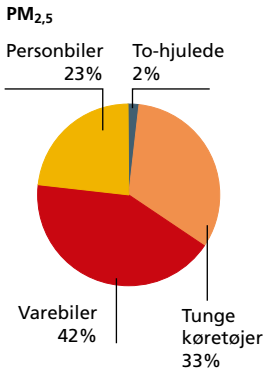
Figur 3-8
Trafikken bidrager med primære partikler fra udstødning og slid på veje, dæk og bremser samt med stoffer, der kan føre til dannelse af sekundære partikler.

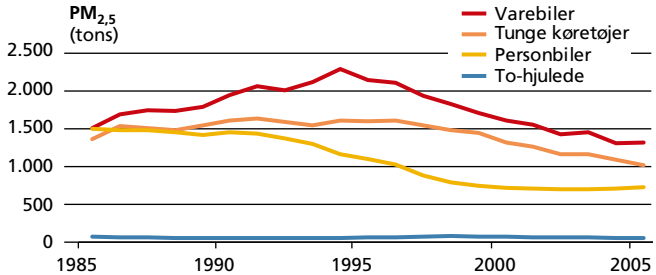
Vejtrafik

Vejtrafikken, specielt dieselbiler, er en af de vigtigste kilder til forurening med partikler. Partiklerne stammer både fra køretøjernes udstødning og fra slid på dæk, bremser og veje (figur 3-8). Hovedparten af de små partikler kommer fra udstødningen.

I 2005 udgjorde partikler fra udstødning 77 % af den totale udledning af partikler fra vejtrafikken. Varebiler er den største kilde til udledning af partikler, og i 2005 udgjorde de 42 % af udledningen fra trafikken. Tunge køretøjer (lastbiler og busser) og personbiler er også store kilder, mens to-hjulede køretøjer (knallerter og motorcykler) kun udgør 2 % af udledningen (figur 3-9).

Siden midten af 1990'erne er udledningerne fra varebiler og tunge køretøjer faldet markant på grund af gradvist skrappere lovkrav til udledningen af partikler på EU-plan – de såkaldte EURO-normer for køretøjer (se kapitel 6). Det har medvirket til, at bilindustrien arbejder på mange fronter for at reducere forureningen fra motorer for at kunne opfylde de opstillede normer. Den tekniske udvikling har bl.a. betydet, at benzinbilerne i dag fremstilles med katalysatorer, som effektivt fjerner 80 % - 90 % af kvælstofoxiderne, samtidig med at udledningerne af flygtige organiske stoffer og partikler bliver fjernet. Katalysatorerne har givet en samlet reduktion i udledningerne på trods af stigningen i den samlede biltrafik.





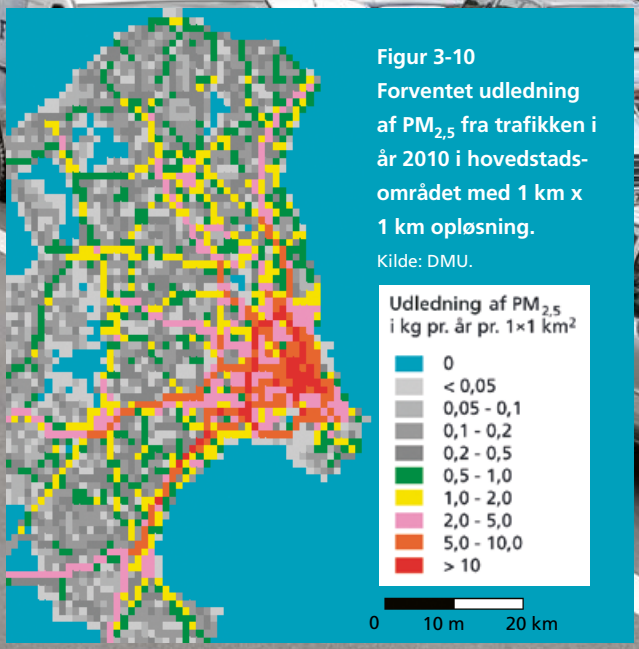
Figur 3-9
Partikeludledning fra udstødning ($PM_{2,5}$) i Danmark, fordelt på køretøjskategorier i 2005 (t.v.) og udviklingen fra 1985 til 2005 (t.h.). Faldet i udledningerne for lastbiler, busser og varebiler siden midten af 1990'erne skyldes skrappere miljøkrav.
Kilde: DMU.

Fra 1998 og frem til 2005 er partikeludledningen fra benzinpersonbiler faldet med 64 %, mens dieselpersonbilers udledning derimod er steget med 46 % i samme periode. Derfor var den samlede udledning fra personbiler næsten konstant i den periode. Dieselbiler kan endnu ikke overholde gældende EURO-normer, hvis de ikke har et filter. En del nye dieselbiler er udstyret med filtre, som fjerner stort set alle partikler uanset størrelse – såvel fine som ultrafine partikler. Andre teknikker går ud på at minimere udledningen af partikler ved udvikling af motorteknologier. Disse teknikker giver dog flere kvælstofoxider, men dem kan man fjerne ved hjælp af en katalysator. Motoroptimering alene kan stadig føre til udledninger af ultrafine partikler, fordi der p.t. ikke er fastsat grænseværdier for ultrafine partikler. Man overvejer at fastsætte grænseværdier for antallet af partikler.

Tabel 3-5 viser, at lastbiler i gennemsnit har den største udledning af partikler. For personbilers vedkommende er udledningsfaktorerne generelt meget større for dieselbiler end for benzinbiler, og dieselvarebilernes udledningsfaktorer er generelt lidt højere end for de tilsvarende dieselpersonbiler. Køretøjer med dieselmotorer og specielle benzinmotorer, der kører på en mager benzin/luft-blanding, er specielt brændstoføkonomiske, men de udleder desværre varierende mængder af faste kulpartikler, som kun kan fjernes fra udstødningsgassen ved hjælp af et filter. Benzinbiler med katalysatorer har specielt lave udledninger af partikler, fordi hovedparten af de halvflygtige organiske forbindelser i udstødningen bliver fjernet. Benzinmotorer med den allernyeste teknologi (direkte indsprøjtning) har dog noget større udledninger end benzinbiler med katalysatorer og de nyeste dieselpersonbiler, der er udstyret med partikelfiltre.

	Udledning fra bilers udstødning $PM_{2,5}$ (mg pr. km)
Personbiler, benzin uden katalysator	23,5
Personbiler, benzin med katalysator	1,1
Personbiler, diesel (før 1991)	221,5
Personbiler, diesel (EURO 3+4, 2001-2010)	41,0
Personbiler, diesel med partikelfilter (EURO 3+4, 2001-2010)	2,1
Varebiler, diesel (EURO 3+4, 2002-2011)	61,3
Varebiler, diesel med partikelfilter (EURO 3+4, 2002-2011)	3,0
Lastbiler, gennemsnit	172,5

Tabel 3-5
Sammenligning af udledningsfaktorer for forskellige køretøjer. Gamle biler har den største partikeludledning. Benzinbiler med katalysatorer og dieselbiler med partikelfiltre forurener mindst. EURO-normer er nærmere omtalt i kapitel 6.
Foto: Bjarne Jensen.



Figur 3-10
Forventet udledning af $PM_{2,5}$ fra trafikken i år 2010 i hovedstadsområdet med 1 km x 1 km opløsning.
Kilde: DMU.

Stigningen i udledningen af de slidrelaterede partikler følger væksten i trafikken, og for partikler fra slid på bremser, dæk, og veje var der i perioden 1985-2005 en stigning på ca. 60 %. Dækslid er den største kilde til udledning af partikler efterfulgt af slid på veje og bremser. Hvis man vil begrænse udledningen fra slid, må man reducere trafikken og/eller fremme teknologiudviklingen af nye typer af dæk, bremser og vejbelægninger.

Figur 3-10 viser den forventede udledning af partikler fra hovedstadsområdet i 2010. Det er tydeligt at se, at de store udledninger sker fra vejene og især fra de store hovedindfaldsveje til København.

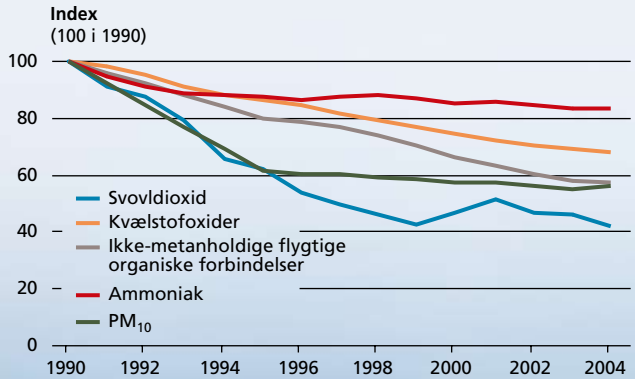
Stoffer der kan danne partikler

Som omtalt i kapitel 2 bliver visse former for partikler dannet ud fra en række forskellige stoffer. De vigtigste stoffer er svovldioxid, kvælstofoxider, ammoniak og flygtige organiske forbindelser, der danner ammoniumsulfat, ammoniumnitrat og sekundære organiske partikler. Disse stoffer såvel som de sekundære partikler bliver typisk dannet uden for Danmarks grænser og transporteret med vinden til Danmark. Luftens indhold af partikler i Danmark afhænger derfor også af udledningen af stoffer og partikler i andre lande, specielt i Europa.

I Danmark og Europa er de vigtigste kilder til udledning af svovldioxid energiproduktion, industri og skibstrafik. For kvælstofoxider er transport, industri og energiproduktion de største kilder. Udledninger af flygtige organiske forbindelser stammer fra mange forskellige kilder og omfatter ufuldstændige forbrændingsprocesser fra bl.a. personbiler, skibstrafik og brændeovne.

Stort set alle udledninger af ammoniak stammer fra aktiviteter i landbruget, hvor hovedparten stammer fra husdyrgødning under håndtering af gødningen i stalden og under spredning på marken. Andre bidrag kommer fra afgrøder og brug af kunstgødning.

Siden 1990 er stoffer, der danner sekundære partikler, faldet i Europa, hvilket skyldes mindskede udledninger af svovldioxid, kvælstofoxider, ammoniak og ikke-metanholdige flygtige organiske forbindelser (NMVOC), der bidrager væsentligt til dannelsen af sekundære partikler (figur 3-11).



Figur 3-11
Udviklingen i udledningen af primære partikler og stoffer der danner sekundære partikler i Europa. Siden 1990 er udledningerne faldet mellem 17 % og 58 % – størst for svovldioxid og mindst for ammoniak. Skibs- og flytrafik er ikke medtaget.

Kilde: EEA.

Foto: Britta Munter.

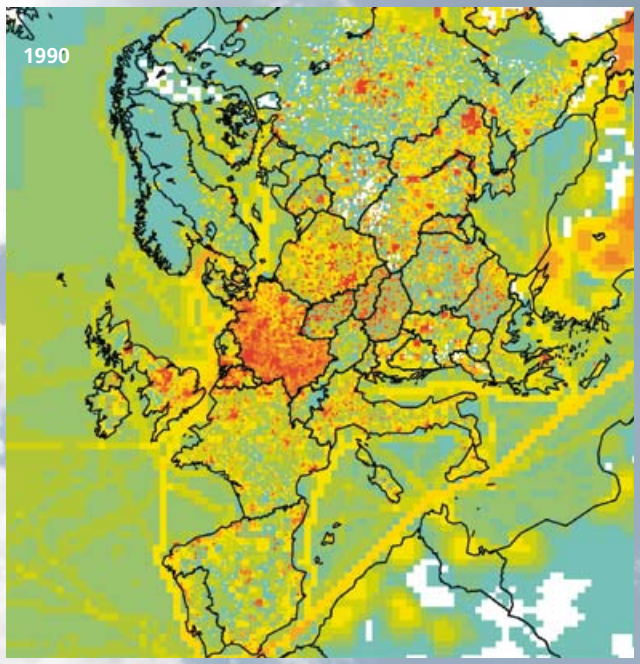
De største reduktioner ses for kraftværker, vejtrafik og industrier, hvor nye teknologier og andre brændsler har bidraget til at reducere udledningerne. Inden for kraftværkssektoren er der fx sket store reduktioner i udledningerne af svovldioxid og kvælstofoxider, hvilket skyldes en øget anvendelse af afsvovlingsanlæg og teknologier, der mindsker udledningerne af kvælstofoxider. Specielt udledningen af svovldioxid er reduceret kraftigt i såvel Europa som Danmark. I Danmark er udledningen af svovldioxid reduceret med hele 95 % fra 1980 til 2005. Vejtrafikkens udledninger af kvælstofoxider og ikke-metanholdige flygtige organiske forbindelser er gradvis mindsket ved indførsel af biler med katalysatorer. I 1990'erne blev udledningerne af ammoniak fra landbruget også reduceret meget, hvilket skyldes, at Danmark har ført en aktiv miljøpolitik, der bl.a. har betydet en bedre udnyttelse af kvælstof i husdyrgødning samt restriktioner i forhold til opbevaring og spredning af husdyrgødning.

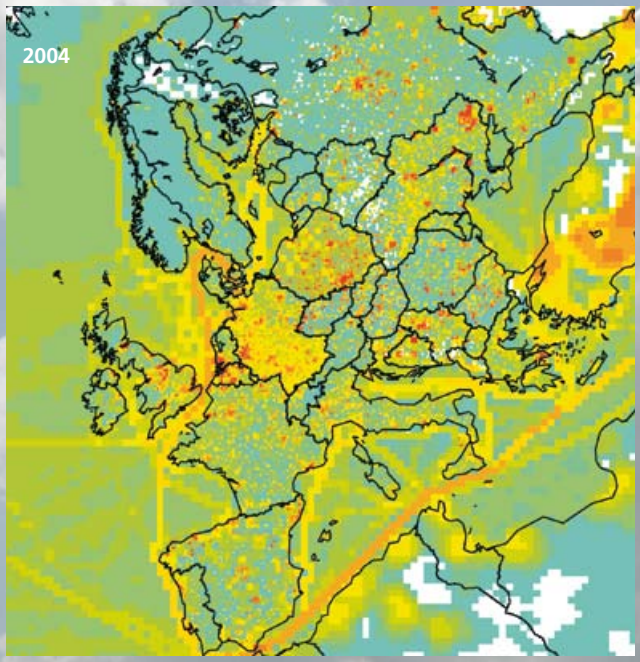
Kapitel 6 giver en mere udførlig beskrivelse af, hvorledes udledningerne af partikler og andre stoffer er blevet reguleret.

Koncentrationen af partikler i luften i Danmark afhænger selvfølgelig af, hvor store udledningerne er, men også i høj grad af hvor udledningen sker. Figur 3-12 viser, hvor meget svovldioxid der udledes forskellige steder i Europa, og hvorledes størrelsen af udledningerne har ændret sig fra 1990 til 2004. Kortene viser, at der inden for de 15 år er blevet betydelig mindre forurening med svovldioxid fra landjorden i Europa, mens forureningen fra skibe er steget. Sidstnævnte er indikeret ved de gule og orange linjer på havet. Denne forskel skyldes, at der både på nationalt og europæisk plan er gennemført stramme reguleringer af udledningen af forurenede stoffer fra anlæg på landjorden, mens der indtil nu kun har været en begrænset miljømæssig regulering af den internationale skibstrafik.

Naturlige kilder

De naturlige kilder til partikler udgør en ikke ubetydelig del af partiklerne. Som beskrevet i kapitel 2 er nogle af de vigtigste naturlige kilder til partikler havsalt, vindopblæste partikler (jordfygning), vilde brande og vulkanudbrud.





Figur 3-12
Kort over udledningen af svovldioxid i Europa i 1990 og i 2004.

Kilde: DMU.

Foto: Britta Munter.

Udledning
(kg pr. km² pr. år)

Over	10.000
5.000 –	10.000
2.000 –	5.000
1.000 –	2.000
500 –	1.000
200 –	500
100 –	200
50 –	100
20 –	50
10 –	20
Under	10

Desuden bidrager vegetationen med udledning af gasser, som kan føre til dannelse af sekundære partikler (figur 3-13). I sagens natur er det svært at gøre noget ved disse kilder, men på den anden side har menneskelige aktiviteter også indflydelse på mængden af partikler fra disse naturlige kilder. Mange vilde brande er startet af mennesker, og

Figur 3-13
Træer udleder store mængder af de såkaldte terpener, der er let flygtige organiske stoffer (VOC). Via kemiske reaktioner i atmosfæren omdannes de til andre organiske stoffer, som binder sig til luftens partikler og dermed øger den samlede mængde af partikler i luften.
Foto: Britta Munter.

anvendelsen af vores landområder påvirker, hvor store arealer der ligger blottet for planter. En regulering af vores adfærd kan derfor påvirke udledningerne af partikler fra naturlige kilder, men indtil videre er der ikke foretaget nogen direkte regulering af disse kilder.

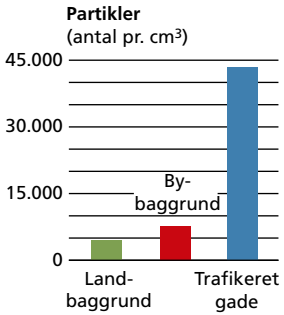
Torv
VEKO
47018

Eksponering med partikler

4

Hvordan og hvor partiklerne bliver udledt og dannet har stor betydning for vores eksponering og dermed for de helbredsmæssige konsekvenser. Vores forståelse af de fysiske og kemiske processer, som bestemmer forekomsten af partikler i atmosfæren, er helt afgørende for, at vi kan foretage en effektiv og økonomisk fornuftig regulering på området.

Foto: Bo Tornvig/www.Chiliarkiv.dk.



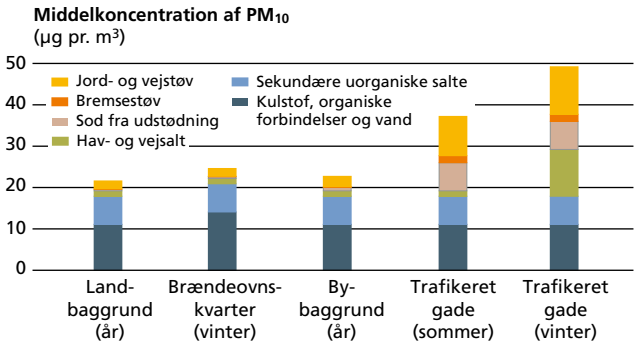
Figur 4-1
Middelkoncentrationen af partikler målt som antal ved to baggrundsstationer og i en trafikeret gade.
Kilde: DMU.

Man kan opdele de enkelte kilder til partikler i høje og lave kilder. Udledninger af partikler fra kraftværker, affaldsforbrændingsanlæg og industri sker overvejende fra høje skorstene og kan derfor betegnes som høje kilder, idet forureningen bliver transporteret over nogen afstand, før den når overfladen. Under transporten til overfladen sker der en fortynding med den omgivende luft. Man regner derfor ikke med, at de lokale høje kilder påvirker luftkvaliteten væsentligt i de danske byområder. Derimod bidrager høje kilder i ind- og udland til den langtransporterede forurening.

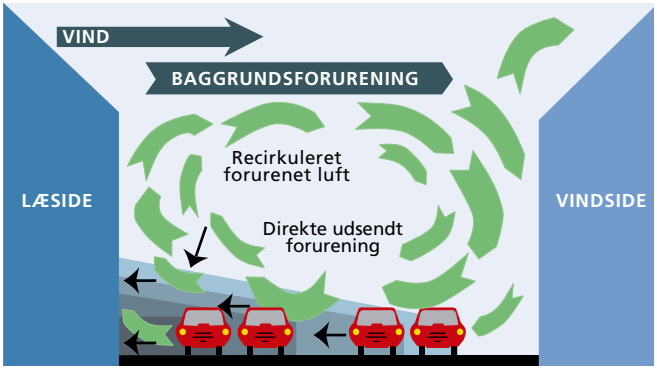
Trafik er et eksempel på en lav kilde. Den lokale trafik i en gade har en stor betydning for koncentrationen af partikler – både som masse og antal af partikler (figur 4-1 og figur 4-2).

Når vi færdes i eller tæt ved trafikerede gader, bliver vi således udsat for høje niveauer af partikelforurening. Er der høje bygninger langs gaden, tager det længere tid, før forureningen bliver fortyndet og transporteret bort fra gaderummet. I dette lukkede gaderum vil der bortset fra i meget stillestående vejr dannes en hvirvel, som medfører, at forureningen cirkulerer i gaden i stedet for at blive transporteret bort (figur 4-3). Dermed forøges koncentrationen af forureningen betydeligt set i forhold til en åben gade. I stillestående vejr er der for lidt kraft i vinden til at danne en hvirvel, og da er den turbulens, som bilerne skaber, af stor betydning for fortynding af forureningen.

Skorstene på boliger med brændeovne er en anden lav kilde. Studier i boligområder, fx landsbyer og forstæder til



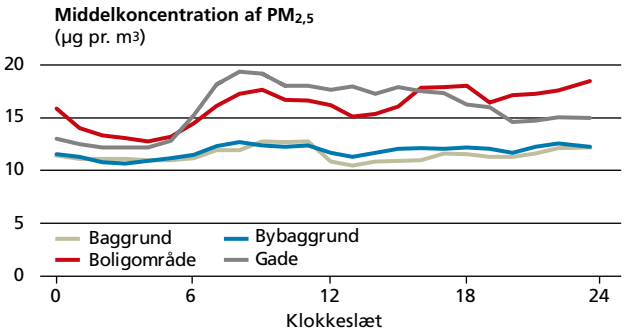
Figur 4-2
Middelkoncentrationer af PM_{10} målt som masse ved to forskellige baggrundsstationer, en gadestation og en station i et brændeovnskvarter. Brændeovnskvarterer finder man typisk i landsbyer og forstæder til de større byer.
Kilde: DMU.



Figur 4-3
Illustration af spredningen af forurening i et lukket gaderum. Forureningen kan være op til en faktor 5 højere i læsiden end i vindsiden.

de store byer, hvor brændeovne er en vigtig opvarmningskilde, viser, at forureningen med partikler er i samme størrelsesorden som i de mest trafikerede bygader. I fyringssæsonen kan vi opleve korte perioder med meget høje koncentrationer af partikler i sådanne kvarterer med brændeovne. Disse perioder med forhøjede koncentrationer finder vi ved vejrsituationer med lave vindhastigheder. Udledningen af partikler fra brændeovne påvirker meget lokalt og følger ligesom de trafikale udledninger et klart døgnmønster (figur 4-4). For brændeovnene hænger dette mønster naturligvis sammen med, hvornår folk er hjemme og anvender ovnen.

Udledning af kvælstofoxider, ammoniak, og svovlforbindelser fra diverse kilder fører, som nævnt i kapitel 2, til dannelse af sekundære partikler. Dannelsen af sekundære partikler sker langsomt under transporten – i løbet af timer – og derfor stammer en stor del af luftens sekundære partikler i Danmark fra udledninger i vore nabolande.



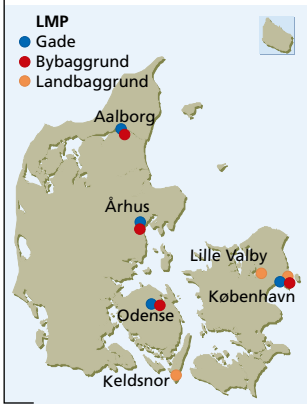
Figur 4-4
Middelkoncentrationer af $PM_{2,5}$ målt som masse på en almindelig arbejdsdag om vinteren. Målingerne er fra en trafikeret gade i København, et boligområde i en landsby med mange brændeovne, en bybaggrundsstation og en baggrundsstation placeret langt fra lokale kilder. Data er et gennemsnit over en 7 ugers periode i 2002.
Kilde: DMU.

Overvågning af luftkvalitet

Ligesom vi kortlægger og rapporterer udledningen af partikler, overvåger vi løbende luftkvaliteten i Danmark. Vi udfører bl.a. overvågningen for at have et kendskab til niveauet af de sundhedsskadelige partikler. Men vi overvåger også, fordi partikelforureningen overskrider landegrænser, og derfor har EU stillet krav til de enkelte medlemslande om at overvåge forureningen af partikler inden for landenes grænser. På EU-plan samles overvågningsresultaterne fra de enkelte lande for at skabe et europæisk overblik.

I Danmark bliver overvågningen af de luftbårne partikler primært foretaget i forbindelse med det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP). LMP består af 11 målestationer fordelt i de fire største danske byer (København, Århus, Aalborg og Odense) samt to målestationer placeret i baggrundsområder uden for byerne (Keldsnor og Lille Valby) (figur 4-5). I byerne er der to forskellige slags målestationer, der henholdsvist er placeret på gadeniveau og på toppen af huse. Den første type målestation giver forureningsniveauet i gaden, mens den anden type station er etableret for at måle den såkaldte bybaggrund (figur 4-6).

Figur 4-5
Målestationerne i det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP) ligger i de fire største danske byer. Endvidere er der to målestationer uden for byerne, som vi bruger til at vurdere forureningsniveauet på landet (landbaggrund).
Kilde: DMU.



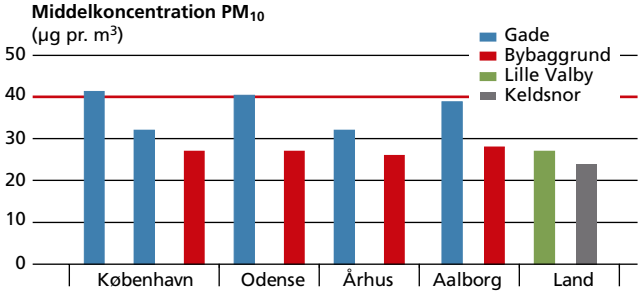
På alle målestationerne foretages der målinger af den daglige middelkoncentration af PM_{10}. På nogle målestationer måles også $PM_{2,5}$.

Figur 4-7 viser resultaterne fra målingerne af PM_{10} i 2006 på målestationerne i LMP. Koncentrationen af PM_{10} er størst på gadestationerne, hvor den ligger i intervallet fra 32 – 41 µg pr. m^3. Forskellen mellem koncentrationen af PM_{10} på de fem gadestationer i LMP skyldes store forskelle i mængden af trafik. På H. C. Andersens Boulevard i København er koncentrationen af PM_{10} ca. 30 % højere end på Jagtvej ligeledes i København, hvilket hænger sammen med, at der på en hverdag gennemsnitlig kører omkring 70.000 biler på H. C. Andersens Boulevard, mens der på Jagtvej kun kører omkring 25.000 biler. Endelig spiller bredden af vejen og bygningerne omkring vejen også en væsentlig rolle for koncentrationen af PM_{10}. Koncentrationen af PM_{10} på bybaggrundsstationerne ligger på 26 – 28 µg pr. m^3, hvilket er ca. 30 % lavere end på gadestationerne. Forskellen på gadestationerne og bybaggrundsstationerne

Figur 4-6
Målestationerne i byerne er placeret på gaderne eller væk fra trafikken, fx på hustage (bybaggrund). Billedet viser målestationen på den stærkt trafikerede Jagtvej i København. Det indsatte billede viser luftindtaget til målestationen på taget af H. C. Ørsted Instituttet i ca. 25 meters højde.
Foto: Bjarne Jensen.

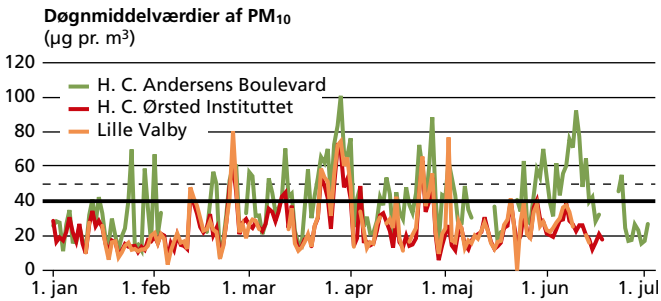
angiver størrelsen af partikelforureningen som følge af den lokale trafik. Der er kun en mindre forskel mellem koncentrationen af PM_{10} i bybaggrund og i landbaggrund. Det skyldes, at en stor del af PM_{10} består af partikler, som er transporteret over store afstande, og denne del af PM_{10} er jævnt fordelt mellem by og land.

Vi anvender også målingerne af PM_{10} til at vurdere, om luftkvaliteten overholder de grænseværdier, som EU har opstillet for indholdet af partikler i luften. I 2006 lå den årlige middelværdi af PM_{10} over grænseværdien på 40 µg pr. m^3 på H. C. Andersens Boulevard i København og på gadestationen (Albanigade) i Odense (se figur 4-7).



Figur 4-7
Årlige middelværdier af PM_{10} målt som masse på målestationerne i LMP i 2006. Den røde linje viser grænseværdien for årsmiddelværdien. PM_{10} på gadestationerne (blå) er tydeligt større end PM_{10} i bybaggrund (rød) og på landet (grøn/grå).
Kilde: DMU.

Figur 4-8 viser døgnmiddelværdier af PM_{10} på en gadestation (H. C. Andersens Boulevard), i bybaggrund (H. C. Ørsted Instituttet) og i landbaggrund (Lille Valby) for det første halvår af 2007. Figuren viser også grænseværdierne for henholdsvis årsmiddelværdien (40 µg pr. m^3) og for døgnmiddelværdien (50 µg pr. m^3), som ikke må overskrides mere end 35 gange per år. For H. C. Andersens Boulevard var der i første halvår af 2007 mere end 35 overskridelser af grænseværdien på 50 µg pr. m^3, så allerede der kunne vi vurdere, at der i 2007 ville være en overskridelse af grænseværdien for døgnmiddelværdien. I by- og landbaggrund var der ikke nær så mange overskridelser. I perioden omkring den 1. april 2007 var der gentagne overskridelse af grænseværdien på 50 µg pr. m^3 på alle tre målestationer, og værdierne fulgte hinanden nøje. Det er et typisk tegn på luftforurening, der er transporteret til Danmark over lange afstande, og det hænger i dette tilfælde sammen med en periode med varmt og solrigt vejr, hvilket næsten altid giver anledning til transport af luftforurening fra mere forurenede egne i Europa. I andre perioder, fx i juni, var der kun over-



Figur 4-8
Døgnmiddelværdier af PM_{10} i første halvdel af 2007 målt som masse på en gadestation (H. C. Andersens Boulevard), i bybaggrund (H. C. Ørsted Instituttet) og i landbaggrund (Lille Valby). Den fuldt optrukne og den stiplede linje viser henholdsvis grænseværdierne for årsmiddelværdien (40 µg pr. m^3) og for døgnmiddelværdien (50 µg pr. m^3).
Kilde: DMU.

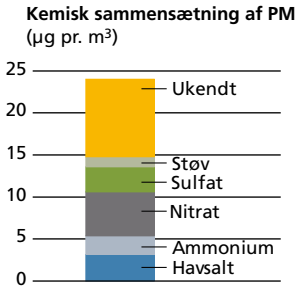
skridelser af grænseværdien på 50 µg pr. m^3 på H. C. Andersens Boulevard, hvilket viser, at kilden til overskridelserne primært skyldes den lokale trafik på boulevarden.

Danmark har også et andet luftovervågningsprogram kaldet baggrundsovervågningsprogrammet (BOP), som primært fokuserer på luftkvaliteten i danske baggrundsområder. I dette overvågningsprogram laves målinger af det kemiske indhold af partiklerne, således at vi kan opnå viden om, hvad partiklerne er sammensat af. Desværre er måleteknikkerne i dag endnu ikke udviklet nok til, at vi kan få viden om alle de kemiske stoffer, som partiklerne indeholder, men ud fra målingerne med en såkaldt filterpack-opsamler kan vi få en god viden om de sekundære uorganiske partikler samt om indholdet af en række andre uorganiske stoffer i partiklerne, fx havsalt, tungmetaller, jern og silicium.

På fem af målestationerne i BOP (figur 4-9) anvendes filterpack-opsamleren til at opsamle døgnprøver af partikler. Dette foregår ved at suge luft med en konstant luftstrøm gennem et partikelfilter, som opsamler indholdet af partikler i 57 m^3 luft. Figur 4-10 viser filterpack-opsamleren på

Figur 4-9
Målestationerne i baggrunds-overvågningsprogrammet (BOP). Symbolerne viser, hvor der bliver målt partikler med filterpack-opsamleren, og hvor afsætning af luftforurening med nedbørsopsamlere bliver målt.

Figur 4-10
Filterpack-opsamler, der bl.a. anvendes til måling af de uorganiske stoffer i partikler. Øverst sidder 8 metalrør, hvor i der sidder en holder med et partikelfilter. Opsamlingen foregår ved, at en pumpe suger en konstant luftstrøm gennem filtret i et døgn, hvorefter opsamleren automatisk skifter til den næste holder. Pumpe og elektronik er placeret i den grå boks forneden.
Foto: DMU.



Figur 4-11

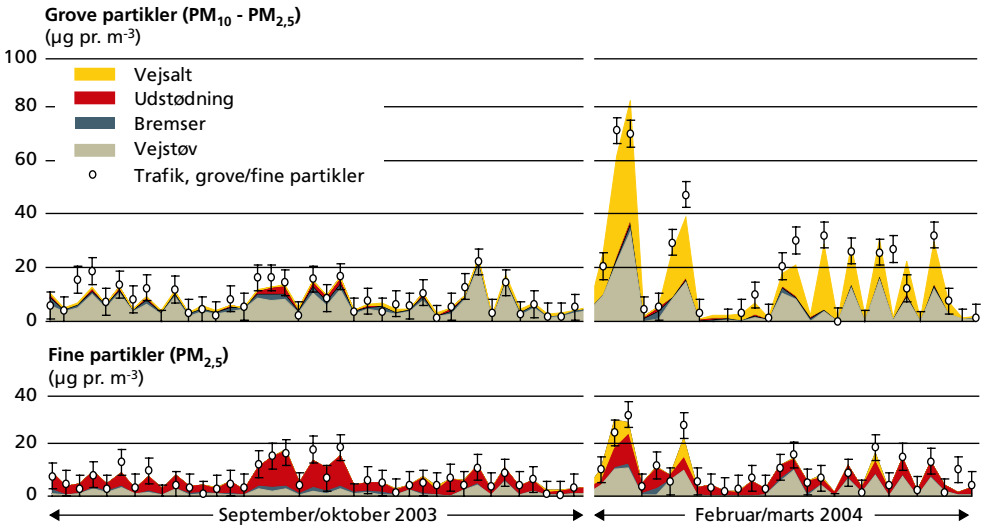
Den kemiske sammensætning af partiklerne målt med en filterpack-opsamler på Keldsnor i 2006.

Kilde: DMU.

målestationen Keldsnor, og figur 4-11 viser de typiske resultater fra målingerne. Omkring 13 % af partiklerne stammer fra havsalt, der primært er sammensat af natrium (Na), klor (Cl), magnesium (Mg) og sulfat (SO_4^{2-}), mens ca. 43 % består af sekundære partikler med et indhold af ammonium (NH_4^+), nitrat (NO_3^-) og sulfat (SO_4^{2-}). Støv udgør omkring 5 %, mens 38 % af indholdet i partiklerne er ukendt.

Feltstudier

Partiklerne fra trafikken stammer ikke kun fra udstødningen, men kommer også fra slid på bremser og ophvirvling af vejstøv. En nøjere bestemmelse af disse bidrag og deres fordeling på forskellige størrelser af partikler kræver særlige studier med målinger, som rækker ud over de normale måleprogrammer. Der er derfor behov for at supplere overvåg-



Figur 4-12

Grove partikler (PM_{10} - $PM_{2,5}$) og fine partikler ($PM_{2,5}$) målt på H. C. Andersens Boulevard fratrukket tilsvarende måleresultater fra taget af H. C. Ørsted Instituttet – september/oktober 2003 og februar/marts 2004. Variationen (inden for måleusikkerheden) kan forklares fuldstændigt med fire typer af partikler (vejsalt, udstødning, bremsestøv og vejstøv). Analysen er gennemført ved hjælp af partiklernes indhold af grundstoffer og deres fordeling på partikelstørrelser.

Kilde: DMU.

	Sep./okt. 2003		Feb./mar. 2004	
	$PM_{2,5}$	PM_{10}	$PM_{2,5}$	PM_{10}
Vejsalt	**0,2**	**0,5**	**1,2**	**10,0**
Udstødning	**4,0**	**5,0**	**3,4**	**4,2**
Bremser	**0,8**	**1,7**	**0,7**	**1,3**
Vejstøv	**1,4**	**7,1**	**3,4**	**9,3**
Sum	**6,4**	**14,3**	**8,6**	**24,8**

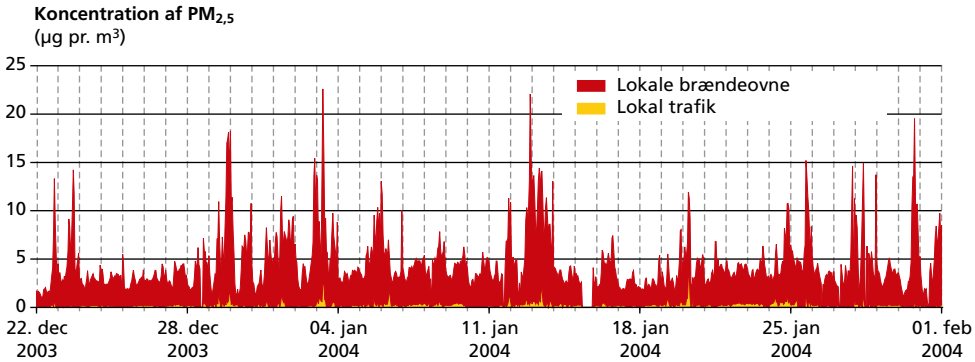
Tabel 4-1
De lokale trafikbidrag til $PM_{2,5}$ og PM_{10} på H. C. Andersens Boulevard, målt som masse dels under normale forhold (september/oktober 2003), dels i en periode med vintersaltning (februar/marts 2004). Det lokale trafikbidrag er beregnet ved hjælp af målinger på H. C. Andersens Boulevard og H. C. Ørsted Instituttet. Enheden for tallene i tabellen er µg pr. m³.
Kilde: DMU.

ningsprogrammerne med feltstudier, som kan give mere detaljerede oplysninger om kilderne til partikler i Danmark.

Ved to feltstudier udført af DMU i henholdsvis 2003 og 2004 blev der opsamlet partikler på filtre ved hjælp af nogle specielle prøveopsamlere, der opdeler PM_{10} i en fin fraktion, som svarer til $PM_{2,5}$, og en grov fraktion, som svarer til forskellen mellem PM_{10} og $PM_{2,5}$. Opsamlingen foregik to steder i København, dels ved målestationen på H. C. Andersens Boulevard og dels på taget af H. C. Ørsted Instituttet (figur 4-12).

Måleresultaterne er sammenfattet i tabel 4-1. Variationen af vejsalt følger variationen af vejstøv, men på grund af vintersaltning er der langt mere vejsalt i prøverne i februar/marts 2004 end i september/oktober 2003. Resultaterne vedrørende partikler fra bremser er særligt interessante. Det ses af tabellen, at partikler fra bremser kun udgør en beskeden del af massen, men en grundstofanalyse har vist, at bremsestøvet især består af metaller, bl.a. jern og kobber, men også af en række forskellige tungmetaller. Bremsepartikler har en aerodynamisk diameter på omkring 3 µm, og partikler med denne størrelse har en forholdsvis stor sandsynlighed (20 % - 30 %) for at blive afsat dybt i alveolerne i vores lunger og dermed påvirke vores sundhed.

Bidrag fra andre kilder end trafik kan have stor betydning på steder, som ikke er repræsenteret i de normale måleprogrammer. Dette gælder fx boligområder uden for byerne, hvor der lokalt kan være væsentlige bidrag fra brændeovne. Man har derfor undersøgt, hvor meget brændeovne bidrager til forureningen om vinteren ved en række feltstudier i tre boligområder omkring København i henholdsvis Gundsømagle, Vindinge og Slagslunde. Feltstudierne er foretaget i boligområder uden industri, således at kun trafik



Figur 4-13

Koncentrationen af $PM_{2,5}$ målt som masse i et brændeovnskvarter i Gundsømagle minus $PM_{2,5}$ målt samtidigt på en målestation på en mark ved Lille Valby ca. 5 km derfra. Kun en forsvindende del af forskellen kan forklares ved den lokale trafik i Gundsømagle. Resten må især tilskrives brændeovnene. Bemærk, at der er huller i figuren, som skyldes manglende data i nogle perioder. De lodrette linjer markerer midnat.

Kilde: DMU.

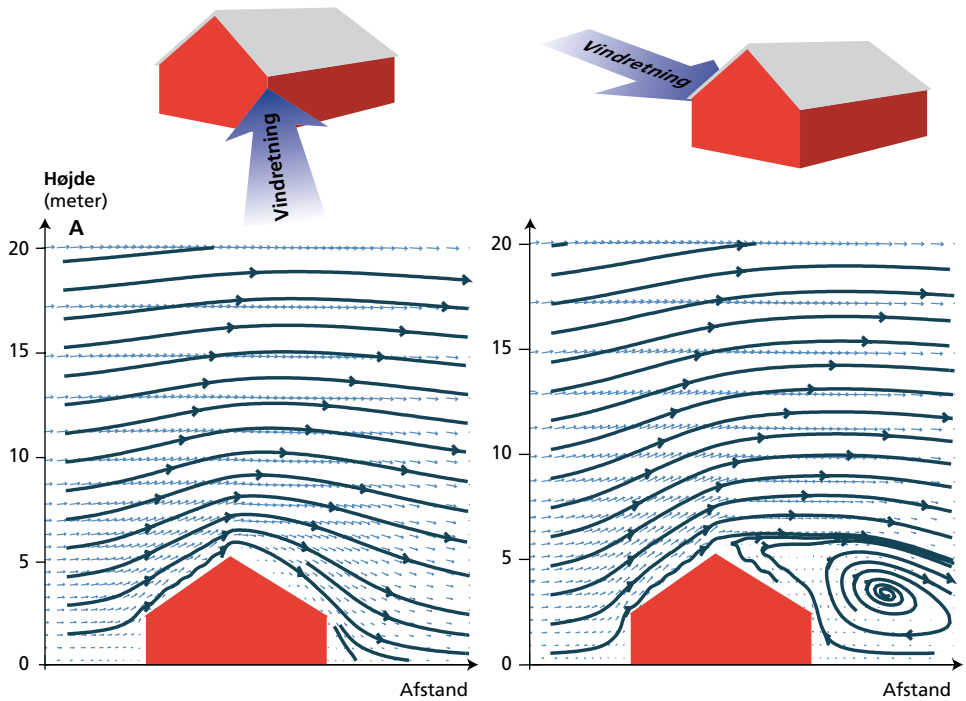
og privat fyring med fast brændsel bidrager væsentligt til den lokale forurening. Man har opstillet to målestationer på hver lokalitet. Den ene målestation er placeret inde i og den anden uden for boligområdet. Forskellen mellem de to målestationer angiver det lokale bidrag til partikelforureningen. Den største forskel i koncentrationen af $PM_{2,5}$ er observeret i Gundsømagle, hvor det lokale bidrag er ca. 4 µg pr. m^3. Figur 4-13 viser måleresultaterne fra Gundsømagle. Kun en forsvindende del af forskellen kan tilskrives den lokale trafik, mens vi må tilskrive resten til de lokale udledninger fra private skorstene. Da vi forventer, at udledningerne fra gas- og oliefyr er ubetydelige, må vi primært tilskrive de lokale udledninger til fyring med fast brændsel. Det gennemsnitlige $PM_{2,5}$-bidrag på 4 µg pr. m^3 fra brændeovnene om vinteren i Gundsømagle er sammenligneligt med det gennemsnitlige bidrag fra trafikudstødning på H. C. Andersens Boulevard (se tabel 4-1). Udledningerne af $PM_{2,5}$ fra brændeovne var noget mindre i Vindinge og Slagslunde (ca. 2 µg pr. m^3).

Modeller på forskellige skalaer

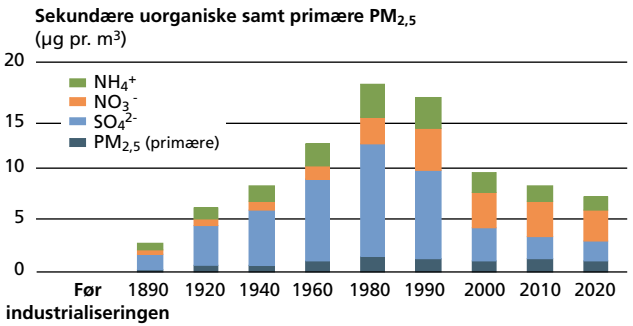
Luftkvalitetsmodeller er værktøjer, som vi bruger til at beregne effekten af tiltag til begrænsning af luftforurening, til at vurdere den forventede udvikling i luftforurening som følge af samfunds- og teknologiudvikling, og til at vurdere befolkningens eksponering for luftforurening. Vi anvender endvidere modellerne som et supplement til målingerne, som vi ikke kan udføre alle steder. Endelig kan modellerne være vigtige værktøjer til at vurdere bidragene fra forskellige kilder, samt til at øge vores forståelse af de processer, som er styrende for luftforureningen i vore omgivelser (figur 4-14).

Luftforureningen i atmosfæren afhænger af en række fysiske og kemiske processer, fx udledning, spredning, omdannelse og afsætning. Disse processer foregår samtidig, men hvor nogle af disse forløber i løbet af brøkdele af sekunder, tager andre processer timer eller dage. En model, som tager hensyn til alle disse processer samtidigt, kræver meget lang tid for at gennemføre beregningerne. Derfor har

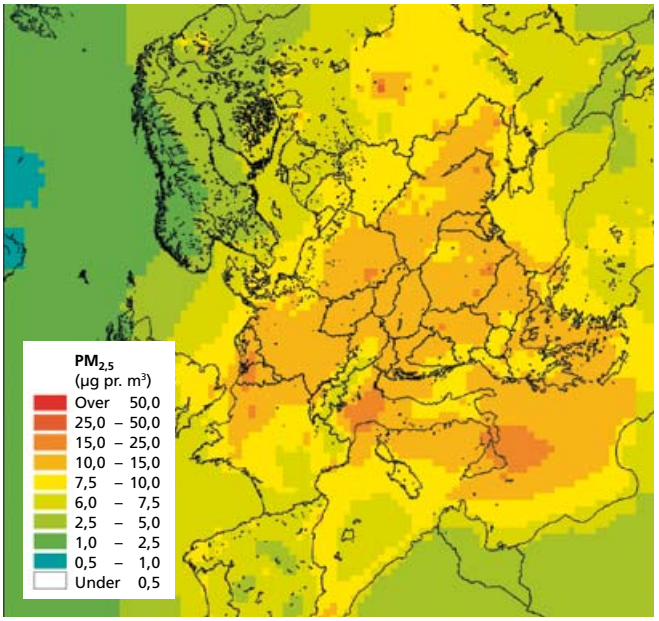
Figur 4-14
Et eksempel på en beregning med en lokalskalamodel af luftstrømninger omkring en bygning. Modellen er vist med 2 vindretninger, til venstre med skrå vindretning mod et hjørne og til højre med vinkelret vindretning. Luftstrømninger tæt ved bygningen har stor betydning for, hvordan forureningen fordeler sig bag bygningen i vindens retning.
Kilde: DMU.



man udviklet en række luftforureningsmodeller til at håndtere forskellige problemstillinger. Man taler her om forskellige skalaer. Det, som sker tæt ved kilden, definerer man som lokalskala, og den forurening, som optræder langt fra kilderne, betegner man som langtransporteret forurening. Mellem disse to yderpunkter har man en forurening, der stammer fra en gråzone, som man ofte kalder mesoskala. Dele af den langtransporterede forurening kan være udledt mere end en uge tidligere, og den kan være transporteret med luften over afstande på mere end 1.000 km. Til sammenligning er tiden, hvori luften opholder sig i et gade-



Figur 4-15
Et eksempel på en beregning med en langtransportmodel af bidraget til $PM_{2,5}$ målt som masse fra sekundære uorganiske partikler, ammonium (NH_4^+), nitrat (NO_3^-) og sulfat (SO_4^{2-}) plus primære $PM_{2,5}$. Beregningerne er foretaget med DMU's langtransportmodel den Danske Eulerske Hemisfæriske Model (DEHM) på baggrund af data fra Det Europæiske Overvågnings- og Vurderingsprogram (EMEP). Modellerne kan endnu ikke beskrive de sekundære organiske partikler, og disse partikler er derfor ikke med i figuren.
Kilde: DMU.



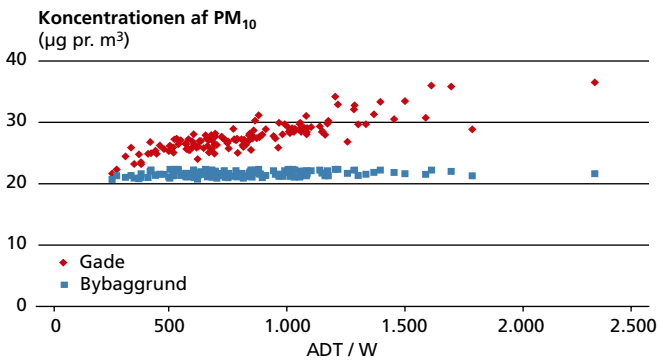
Figur 4-16
Fordelingen af $PM_{2,5}$ som masse (sekundære uorganiske partikler) beregnet for 1999 med DMU's DEHM model. Man ser tydeligt betydningen af de store udledninger i det centrale Europa.
Kilde: DMU.

rum i byen, typisk kun sekunder til minutter. Det er bl.a. denne forskel, som gør det praktisk med forskellige modeller til forskellige skalaer.

Man regner med, at koncentrationen af de sekundære partikler i Europa har toppet, og at den i de kommende år vil falde yderligere. Figur 4-15 viser et eksempel på en beregning af de sekundære uorganiske partiklers bidrag til $PM_{2,5}$ i perioden fra før industrialiseringen og frem til 2020. Beregningerne er foretaget på baggrund af det europæiske overvågnings- og vurderingsprograms (EMEP) opgørelser og prognoser for udledningerne på europæisk skala.

Figur 4-16 viser et andet eksempel på den langtransporterede forurening, hvor man har beregnet fordelingen af $PM_{2,5}$ over hele Europa. Man ser tydeligt betydningen af områderne i det centrale Europa, hvor de største udledninger finder sted. Resultaterne er her vist som årsmiddelværdier. På enkelte dage eller timer vil de aktuelle meteorologiske forhold afgøre gradienterne fra de store udledningsområder – fx kan højtryksperioder over det centrale Europa i perioder føre til stor transport af luftforurening til Danmark og det øvrige Skandinavien.

Koncentrationen af partikler i et gaderum skyldes i det væsentlige bidrag fra trafikken i selve gaden. Figur 4-17 viser beregninger foretaget med en lokalskala-luftforureningsmodel for bygader. Figuren viser koncentrationen af fine partikler afbildet som funktion af den lokale trafik i gaden. Trafikken er divideret med bredden af gaderummet, idet også tætheden, hvormed udledningerne finder sted, har betydning for koncentrationen. Med denne metode kan



Figur 4-17
Beregninger af koncentrationen af PM_{10} som masse for 138 gadestrækninger i København. Beregningerne er foretaget med DMU's lokalskala-gaderumsmodel OSPM (Operational Street Pollution Model). Bidrag fra bybaggrund beregnet med DMU's bybaggrundsmodel UBM (Urban Background Model), som ligeledes er en lokal-skalamodel, er også vist på figuren. Den vandrette akse viser den lokale trafikmængde (årsdøgntrafikken, ADT) divideret med gadebredden (W) i meter (defineret som afstand fra facade til facade for de lukkede gaderum).
Kilde: DMU.

vi meget hurtigt vurdere luftforureningen i en gade, hvis vi kender bredden af gaden og årsdøgntrafikken. Bybaggrundskoncentrationen varierer ud over byområdet med intensiteten af trafikken i nærområdet. Samtidig omfatter bybaggrundskoncentrationen også bidraget fra den langtransporterede forurening.

Luftforureningsmodellerne er baseret på vores eksisterende viden om de styrende processer i atmosfæren. I takt med at vores viden forbedres, bliver vi i stand til at foretage mere præcise beregninger og vurderinger af effekten af forskellige indgreb, den forventede udvikling etc. Allerede nu udgør modellerne imidlertid et meget vigtigt supplement til målingerne af partikelforureningen, og i en række tilfælde kan vi anvende dem til at give en meget hurtig vurdering af koncentrationen af forureningen, som det fx er tilfældet med eksemplet i figur 4-17.

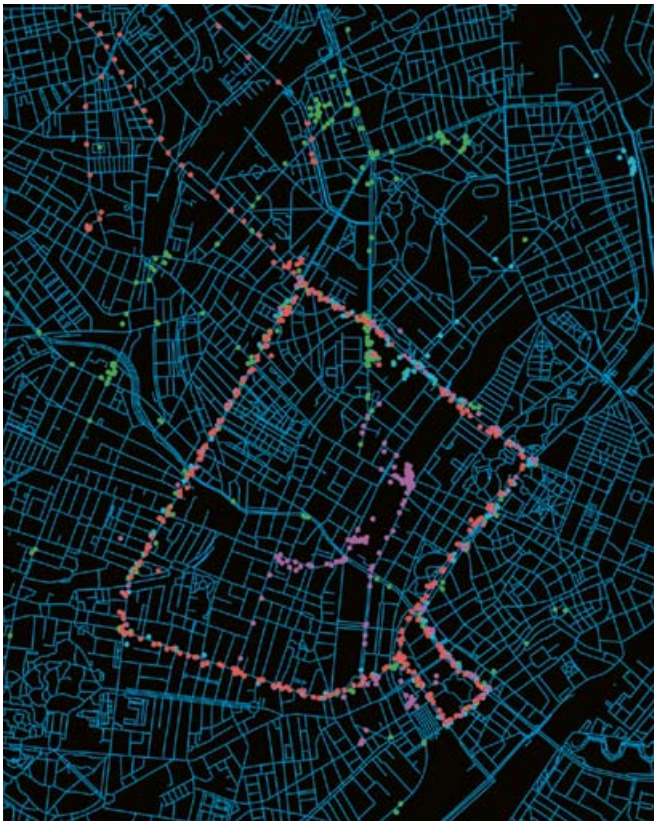
Hvordan beskriver vi befolkningens eksponering?

Vi benytter ofte bybaggrundskoncentrationen af luftforurening som et mål for befolkningens eksponering for luftforureningen. I nogle tilfælde er det imidlertid også muligt at lave mere avancerede vurderinger, såfremt vi har adgang til detaljerede informationer om den enkelte persons aktivitetsniveau og færden.

I forhold til vurderingen af befolkningens eksponering for partikelforurening kan det være interessant at se på, hvad man udsætter sig for langs en rute gennem byen eller ved den enkelte bopæl. Anvendelsen af geografiske informationssystemer (GIS) i kombination med digitale kort og registerdata kan hjælpe os til at udtrække en række af de informationer, som vi kan anvende til sådanne beregninger. Er der tale om mindre studier med et begrænset antal deltagere, kan vi løbende følge en rute gennem byen ved at anvende en mobil partikeltæller koblet til en mobiltelefon med GPS-udstyr og en computer (figur 4-18).

Beregninger foretaget med det danske AirGIS har vist, at vores valg af rute mellem hjem og arbejdsplads kan have betydelig indflydelse på, hvor stor en forurening vi bliver udsat for. DMU har sammenlignet cyklisters eksponering for partikler, alt efter om de vælger den korteste eller den

reneste rute mellem hjem og arbejde. Beregningerne viser, at vi kan reducere vores eksponering for partikler fra den lokale trafik med ca. 30 %, hvis vi vælger den reneste rute.

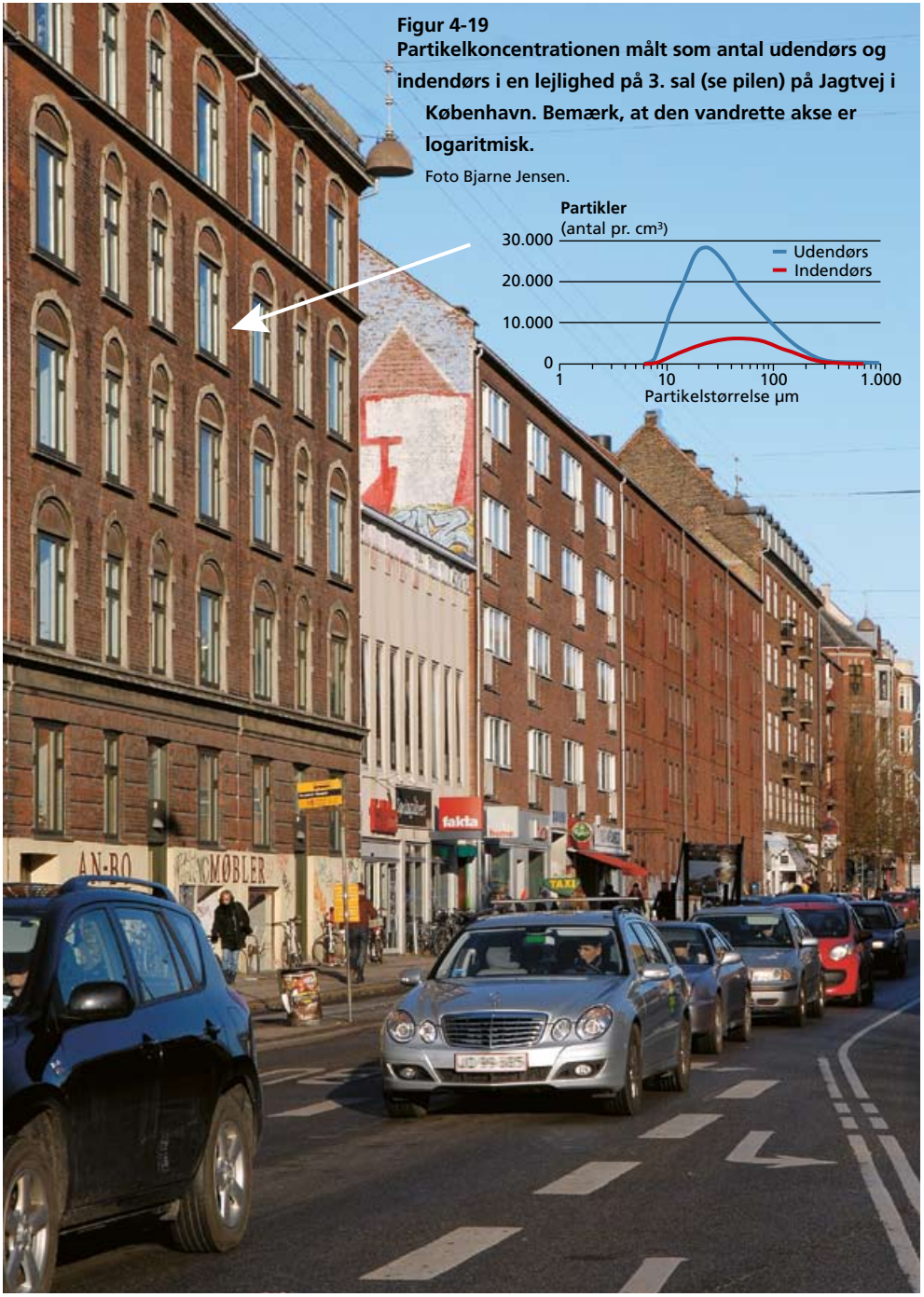


Figur 4-18
Billedet viser en mobiltelefon med indbygget GPS, som løbende kan sende informationer om forsøgspersonens position, samt en bærbar partikeltæller, som løbende måler antallet af partikler i luften.
Illustrationen viser en beregning med DMU's modelsystem AirGIS, der bl.a. indeholder DMU's gadeluftmodel (OSPM). En rute gennem byen registreres ved, at en mobiltelefon løbende sender SMS'er med GPS informationer om personens position. Informationerne lagres på en computer, som herefter kan foretage beregninger for eksponeringen langs ruten. Farverne viser punkter på ruterne for forskellige forsøgspersoner.
Foto: Britta Munter.
AirGis-kort: Martin Hvidberg.

Tilsvarende kan vi reducere vores eksponering for partikler fra den lokale trafik med ca. 20 %, hvis vi har mulighed for at cykle uden for myldretiderne.

En hensigtsmæssig adfærd samt vores tids- og aktivitetsmønster kan således være med til at reducere vores eksponering for lokal forurening. I Danmark opholder vi os fx indendørs i omkring 90 % af tiden. Når vi vil vurdere langtidseksponeringen for luftforurening er det derfor vigtigt, at vi kender forholdet mellem forureningen i inde- og udeluft (figur 4-19). Når vi skal vurdere helbredseffekterne af luftforureningen er det ligeledes vigtigt at tage højde for diverse andre kilder, som optræder i indemiljøet. Det gælder bl.a. passiv rygning, men madlavning kan også give et væsentligt bidrag til koncentrationen af fine partikler. Bidraget fra udeluften afhænger naturligvis af udluftningen. I den forbindelse har det stor betydning, om vi lufter ud til baggården, hvor luften er renest, eller til gadesiden, hvis vi bor tæt ved en trafikeret gade.

Når vi kører i tæt trafik, kan forureningsniveauet i en bil eller bus være højt. Hollandske studier har fx vist, at niveauet af partikler i en bil, som kører i myldretidstrafik, kan være højere end ude på gaden. Det skyldes indsugning af partikler fra de forankørende biler. De moderne bilers pollenfiltre kan muligvis begrænse den partikelforurening, som passerer ind i bilen via ventilationssystemet, men dette er endnu uklart. Sammenlignet med den tid, vi opholder os indendørs, er den eksponering, vi udsættes for i trafikken, imidlertid kortvarig. I det næste kapitel vil vi vende tilbage til de helbredsmæssige konsekvenser af luftforureningen.



Figur 4-19
Partikelkoncentrationen målt som antal udendørs og indendørs i en lejlighed på 3. sal (se pilen) på Jagtvej i København. Bemærk, at den vandrette akse er logaritmisk.

Foto Bjarne Jensen.

5 Helbredseffekter af partikler

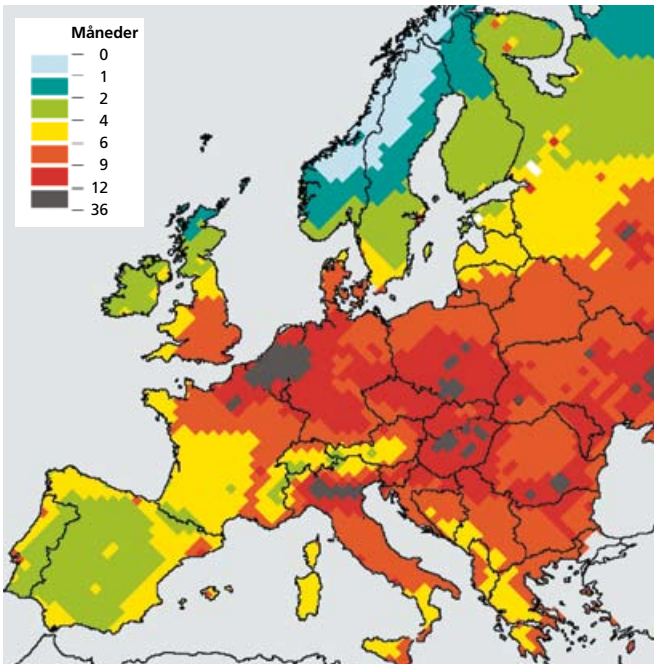
Effekterne af partikelforureningen er meget komplicerede, fordi partiklernes egenskaber, fx deres indhold af forskellige stoffer, deres form og størrelse, optagelse af vand m.v., har stor betydning for, hvorvidt vi indånder dem, og hvor de bliver afsat i vores luftveje.

Foto: Bjarne Jensen.

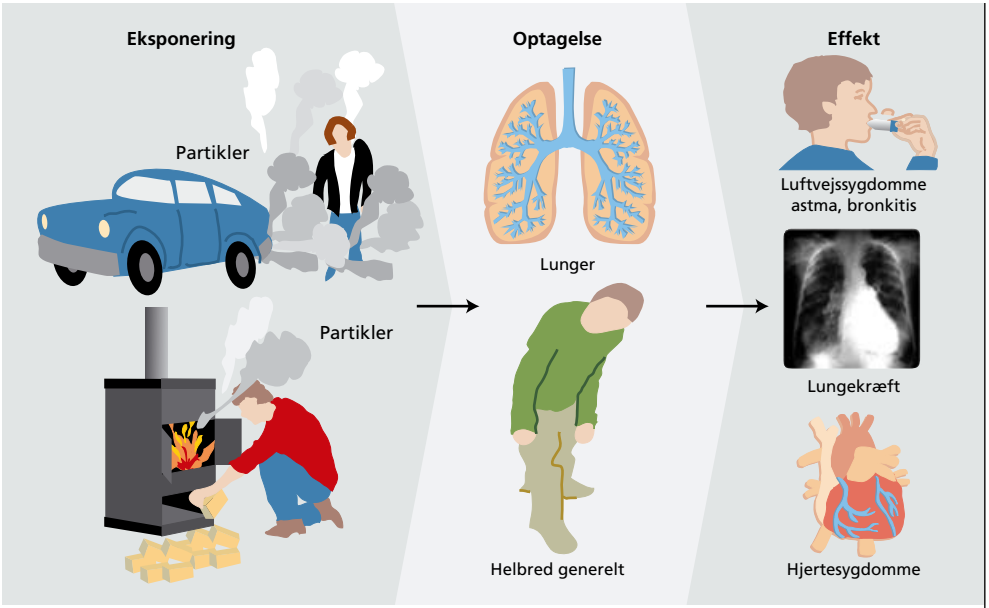
Partikler og sygelighed

I begyndelsen af 1990'erne fandt amerikanske forskere ud af, at der var en tydelig sammenhæng mellem partikelforureningen og dødeligheden i amerikanske byer. Nye undersøgelser bl.a. i Europa bekræftede de amerikanske resultater og viste ligeledes en forøget sygelighed som følge af partikelforurening. Resultaterne viste, at dødeligheden steg med 7 %, når partikelforureningen steg med 10 µg pr. m^3. Det svarer til, at middellevetiden for en vesteuropæisk befolkning bliver reduceret med ca. 1 år.

I dag anser forskere og myndigheder forurening med partikler for at være det væsentligste luftforureningsproblem i forhold til vores sundhed. Den seneste opgørelse foretaget for EU angiver, at 288.000 for tidlige dødsfald årligt skyldes partikelforureningen. En øget dødelighed som følge af forurening med partikler er især et problem i Central- og Østeuropa, som det fremgår af figur 5-1. Der er stor usikkerhed i denne vurdering. I udviklingslandene er partikelforureningen et endnu større problem.



Figur 5-1
Reduceret middellevetid (måneder) i år 2000 som følge af $PM_{2,5}$ fra menneskeskabte kilder.
Kilde: IIASA og CAFE.

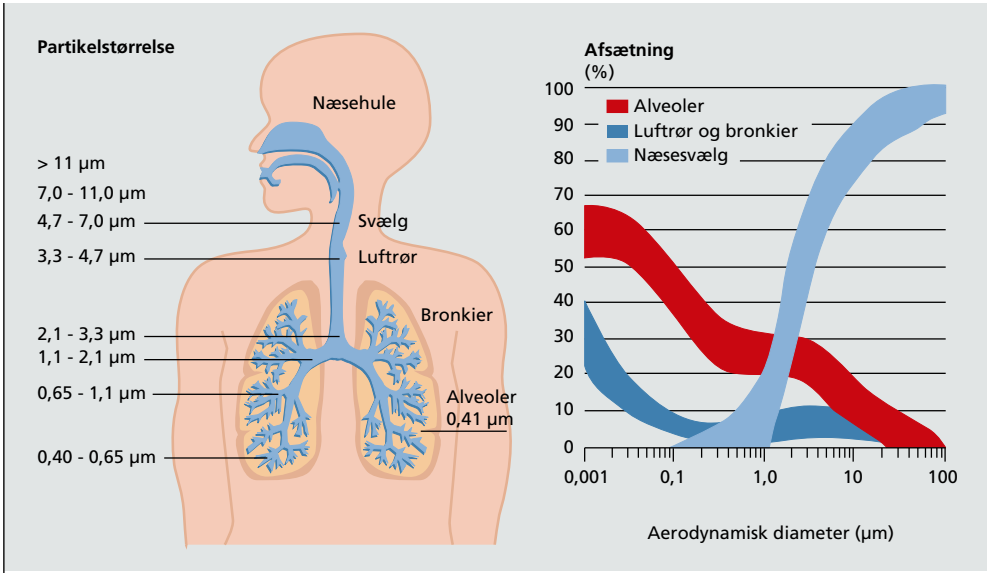


Figur 5-2
Eksponering for luftforurening medfører især en øget risiko for forværring af luftvejssygdomme som astma og bronkitis, blodpropper i hjertet og lungekræft.

Luftforurening påvirker vores helbred på flere måder. Forureningen kan fx føre til luftvejsreaktioner, påvirkninger af blodet og ændringer af kroppens celler, som i værste tilfælde kan føre til udvikling af kræft (figur 5-2).

I forhold til luftforurening taler man om korttidseffekter, der optræder i dagene umiddelbart efter en stigning i luftforureningen i det område, man opholder sig i, og om langtidseffekter, som optræder efter længere tids eksponering (måneder til år) (se tabel 5-1).

De senere års internationale forskning har øget forskernes forståelse af, hvordan forskelle i størrelsen af partikler og forskelle i partiklernes kemiske sammensætning har indflydelse på udviklingen af skader i især lunger og hjertekredsløb (figur 5-3). Forskerne mener, at fine partikler er den farligste type af partikler. De grove partikler, som er større end 4 µm - 5 µm bliver fanget af kroppens forsvarsmekanismer i næse og svælg, mens de mindre partikler trænger længere ned i luftvejene. De mindste partikler passerer forsvarsmekanismerne i vores luftveje, fx fimrehår og slimlag i bronkierne, og bliver afsat i alveolerne (lungeblærerne), som er den del af lungerne, hvor ilt og kuldioxid bliver udvekslet med blodet.



Figur 5-3
Figuren til venstre viser, hvor partiklerne bliver afsat i vores luftveje afhængigt af forskellige partikelstørrelser. Figuren til højre viser, hvor stor risikoen er for, at partikler af forskellige størrelser bliver afsat forskellige steder i luftvejene. De mindste partikler afsættes dybest i luftvejene (alveoler er lungeblærer). Bemærk at den vandrette akse er logaritmisk.

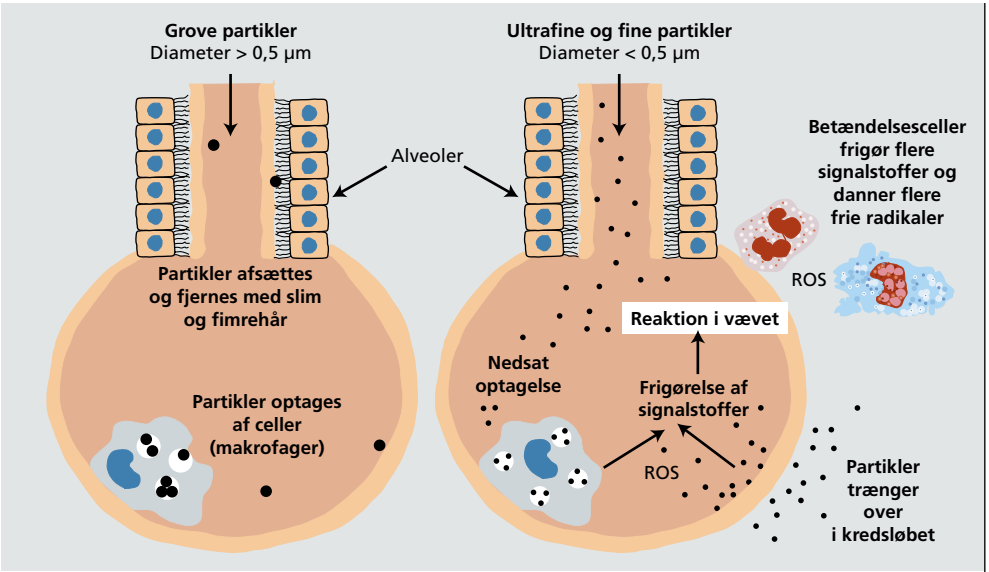
Figur efter: Keld Alstrup Jensen, NFA.

Forskningen har også vist, at den kemiske sammensætning af partiklerne og partiklernes overflade også har en betydning for vores helbred. Det er fx velkendt, at tynde nåleformede partikler, bl.a. asbest, kan forårsage meget alvorlige former for lungekræft.

De såkaldte ultrafine partikler, som er under 0,1 µm i diameter, kan trænge fra alveolerne over i blodkredsløbet.

Tabel 5-1
Eksempler på korttids- og langtidseffekter.

Korttidseffekter	Langtidseffekter
• Død af hjerte- og lungesygdomme	• Død af hjerte- og lungesygdomme, lungekræft
• Indlæggelser for hjerte- og lungesygdomme	• Nye tilfælde af lungekræft
• Indlæggelser for slagtilfælde	• Nye tilfælde af hjerte- og lungesygdomme
• Astmaanfald (voksne og børn)	• Fosterpåvirkning – nedsat fødselsvægt
• Bronkitis, nedre luftvejssymptomer, hoste (voksne og børn)	• Nedsat udvikling af lungefunktion hos børn
• Sygedage (indskrænket aktivitet)	
• Medicinforbrug (astma)	



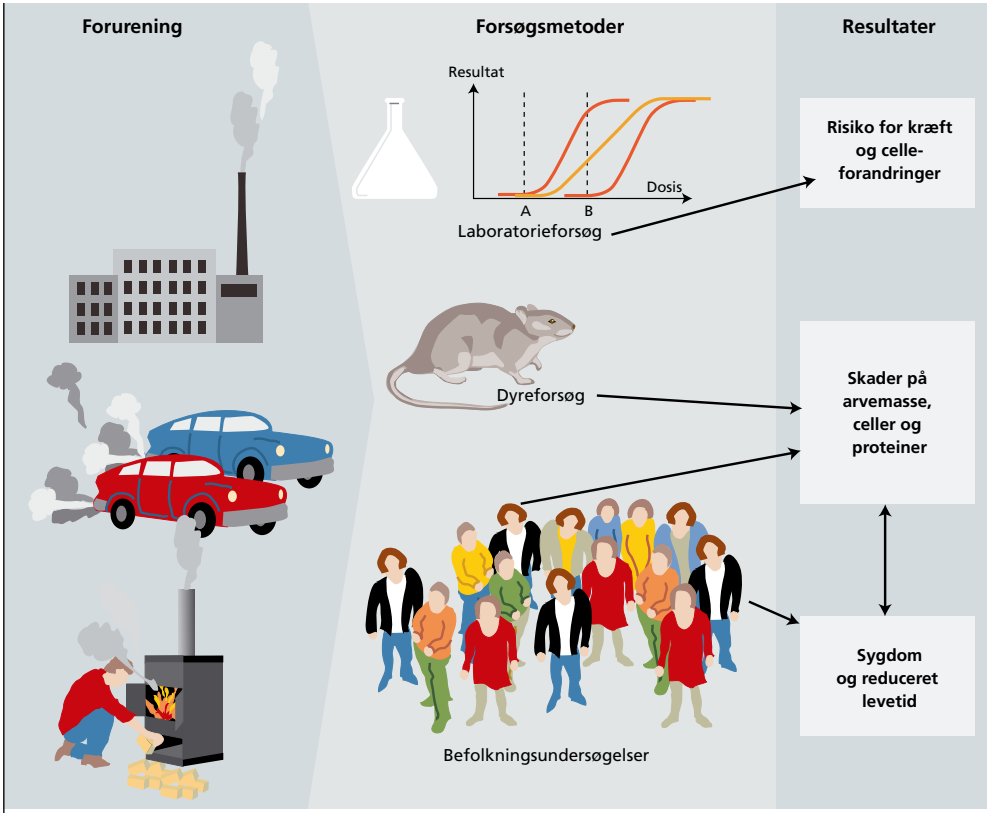
Figur 5-4
Betydning af partikelstørrelse for virkninger på luftvejene. De grove partikler bliver fanget af kroppens normale forsvarsmekanismer, fx ved at såkaldte makrofager optager partiklerne (t.v.), mens de fineste partikler forårsager andre reaktioner, fx dannelse af frie radikaler (ROS) (t.h.).

Figur efter: Steffen Loft, Københavns Universitet.

Partikler påvirker primært vores helbred ved at forårsage betændelsesreaktioner og såkaldt oxidativt stress, som ses ved et overskud af frie iltradikaler (Reactive Oxygen Species, ROS) i forhold til antioxidanter i cellerne (figur 5-4). Det fører til en forværring af astma, andre lungesygdomme og formentligt kræft. Hvis partiklerne trænger fra lungerne over i kredsløbet, kan de udløse betændelsesreaktioner andre steder i kroppen, især i blodbanen. Man mener, at det er medvirkende til åreforkalkning og blodpropper, især i hjertet.

Biomarkører og DNA-skader

En vigtig kilde til vores viden om helbredseffekter af partikelforureningen er biomarkører. Man anvender biomarkører i direkte studier af effekten af partikler på mennesker, men man anvender dem også i dyreforsøg samt i laboratorieforsøg, hvor der anvendes celler fra kroppen. En biomarkør kan fx være mængden eller effekten af partikelforureningen målt i blodprøver eller urin (figur 5-5). En biomarkør kan ligeledes være målinger af mængden af stoffer, som er dannet ved kroppens nedbrydning af partikler. Endvidere kan man måle skaderne på arvematerialet, fx brud på DNA-strengene eller ændringer af DNA-



Figur 5-5
Vurdering af helbredseffekter af luftforurening ved hjælp af flere forskellige metoder – laboratorieforsøg, dyreforsøg og befolkningsundersøgelser.

baserne forårsaget af frie iltradikaler. Skader på vores arvemateriale er særlig kritiske, da de bl.a. kan være forstadier til kræft.

Man udfører ofte undersøgelserne på de hvide blodlegemer, fordi det er dem, som tidligst kommer i kontakt med de partikler, der er optaget i kroppen. En række danske undersøgelser har vist, at en eksponering for fine og ultrafine partikler har en effekt på de hvide blodlegemer, og at partiklerne dermed har en effekt i blodbanen.

Helbredsstudier

Vores viden om sammenhængene mellem helbredseffekter og partikler i luften hviler både på befolkningsundersøgelser og andre studier. De bliver udført på to principielt forskellige måder, der belyser henholdsvis korttids- og langtidseffekterne.

Korttidseffekter

Man undersøger typisk korttidseffekter ved at følge samtidige udsving i helbredsforhold og forureningen med partikler over tid. Korttidseffekterne kan baseres på en lille gruppe, hvor man i en periode måler fx lunge- eller hjertefunktion hver dag (figur 5-6). Man kan også vurdere korttidseffekterne ud fra det totale antal indlæggelser eller dødsfald pr. dag i et bestemt område, ud fra den antagelse, at alle, der bor i området, er udsat for det målte niveau i bybaggrund. Korttidseffekterne kan også baseres på registreringer af helbredsudfald (forekomsten af sygdomme, der er relateret til luftforurening) og beregninger af luftforureningen på de steder, hvor folk færdes.

Undersøgelser af helbredseffekter af partikler fra brændeovne peger på akutte luftvejssymptomer, der er relateret til astma. Virkningen svarer til det, man finder for partikler fra andre kilder, fx fra trafik.

Antallet af indlæggelser i København i 1999 til 2004 for hjerte- og lungesygdomme blandt folk på 65 år og derover og for astma blandt børn har vist sig at have en sammenhæng med de daglige niveauer af PM_{10}, kulmonoxid (CO) og kvælstofdioxid (NO_2) målt i bybaggrund. Antallet af indlæggelser er klart knyttet til koncentrationen af PM_{10} med op til 3-4 dages forsinkelse, mens der ikke er nogen sam-

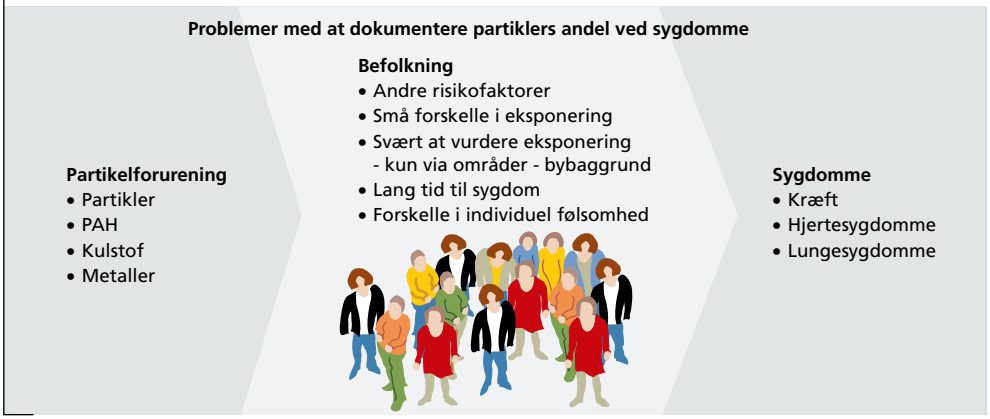
Figur 5-6
Undersøgelse af lungefunktion.
Foto: DMU.

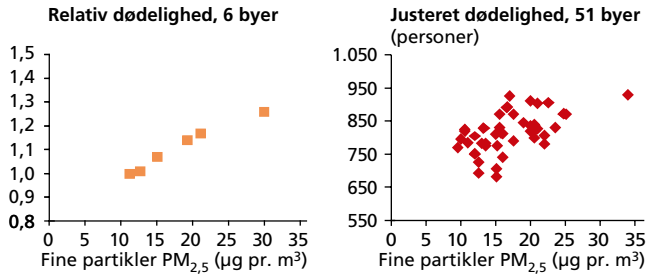
menhæng med kulmonoxid og kvælstofdioxid. I gennemsnit er der 2 % flere indlæggelser over 4 dage, der følger efter en dag med 10 µg pr. m^3 øget PM_{10}. I en del af undersøgelsesperioden har forskerne dagligt bedømt bidraget til partikler (PM_{10}) fra forskellige kilder ved hjælp af analyser af partiklernes indhold af grundstoffer og ioner. Her er der særlige sammenhænge mellem indlæggelser for hjertesygdomme og partikler fra jordstøv, lungesygdomme og partikler fra biomasse og mellem astma og partikler fra trafikken.

Forskere i Tyskland har undersøgt korttidseffekter knyttet til ultrafine partikler i den tyske by Erfurt. Undersøgelserne viser, at ultrafine partikler ligesom $PM_{2,5}$ og PM_{10} har en effekt på dødeligheden på grund af hjerte- og lungesygdomme. En forøgelse i antallet af partikler på ca. 13.000 partikler pr. cm^3 i bybaggrund medfører, at dødeligheden stiger med 4,5 %. I København er det gennemsnitlige antal af partikler, der er mindre end 0,7 µm, godt 8.000 partikler pr. cm^3 i bybaggrund, hvilket svarer til en øget dødelighed på ca. 3 %, ud fra undersøgelsen i Erfurt.

En undersøgelse offentliggjort i tidsskriftet New England Journal of Medicine viser, at udstødningsgasser fra biler øger risikoen for iltmanglen i hjertet og forringer kroppens evne til at opløse blodpropper. I undersøgelsen indgik 20 mænd, der tidligere havde haft en blodprop i hjertet. Denne og lignende undersøgelser viser klart, at en eksponering for udstødningsgasser påvirker kredsløbet og er med til at forklare, hvorfor luftforurening øger risikoen for blodpropper.

Figur 5-7
Det er svært at måle eksponeringen præcist, og i forhold til fx det at ryge, giver en eksponering for luftforurening en ret lille øget risiko.





Figur 5-8
To amerikanske undersøgelser viser en sammenhæng mellem øget dødelighed og høj partikelforurening, men der er del usikkerhed på denne vurdering. Grafen t.v. viser resultaterne fra en undersøgelse i 6 byer.
Kilde: Dockery et al., 1993.

Grafen t.h. viser en langt større undersøgelse i 51 byer.
Kilde: Pope et al., 1995.

Langtidseffekter

Når man undersøger langtidseffekter af luftforurening, følger man en stor (5.000 - 500.000 personer) velkendt befolkningsgruppe (kaldet en kohorte), der bor i områder eller byer med forskellige niveauer af luftforurening (figur 5-7 og 5-8). Man bedømmer forureningsniveauet ud fra en eller få målestationer i bybaggrund, der dækker ret store områder. Man antager, at personer inden for et område bliver udsat for samme forurening. Man kan også vurdere forureningsniveauet for enkelte personer ved hjælp af forureningsdata (målinger eller modeller) for hver bolig, arbejdsplads, transportvej m.v. En tredje metode er at anvende fx afstand til nærmeste trafikerede vej som et udtryk for forureningen fra trafikken. Man følger udviklingen i helbredsstatus ved de forskellige niveauer af luftforurening gennem en længere periode. Undersøgelserne tager også højde for andre faktorer, fx rygning, alkoholforbrug, social status, kost og andet, som kan påvirke risikoen for helbredseffekter.

To amerikanske undersøgelser har påvist en øget dødelighed på grund af partikelforurening (figur 5-8). Den ene undersøgelse omfatter ca. 8.000 mennesker i seks større amerikanske byer, mens den anden undersøgelse omfatter ca. 550.000 mennesker i 51 byområder. Forskerne baserer deres undersøgelser på niveauerne af partikler i bybaggrundsområder, og der indgår ikke specielle vurderinger af bidrag fra trafik og andre kilder. Undersøgelserne viser, at forurening med partikler øger dødeligheden for især personer med luftvejslidelser, hjerte-kar-sygdomme og sukkersyge. Den første undersøgelse viser, at dødeligheden stiger med 14 %, hvis partikelforureningen stiger med 10 µg pr. m^3. Den anden undersøgelse og senere opfølgende

undersøgelser viser, at dødeligheden stiger med 6 % - 7 % ved en stigning i partikelforureningen på 10 µg pr. m^3. Eller sagt på en anden måde, hvis dødeligheden i en befolkningsgruppe fx er 1 % pr. år, så vil en 7 % forøgelse i partikelforureningen føre til en samlet dødelighed på 1,07 %. Undersøgelserne viser endvidere, at dødeligheden falder i områder, hvor partikelforureningen falder.

I en hollandsk undersøgelse har forskere fulgt 5.000 personer i alderen 55 - 69 fra 1986 til 1994. Undersøgelsen viser, at dødeligheden ved hjerte-lunge-lidelser bliver fordoblet, hvis personerne bor 100 m fra en motorvej eller 50 m fra en større gade i bycentre. Den totale dødelighed er 53 % højere i forhold til personer, der bor langt fra trafikerede veje, beregnet for en 10-års periode. Den hollandske og de amerikanske undersøgelser er ikke direkte sammenlignelige på grund af forskellene i mål for eksponeringen, men størrelsesordenen af effekten af luftforurening svarer til hinanden.

Den øgede dødelighed reducerer den gennemsnitlige levealder i befolkningen. Verdenssundhedsorganisation (WHO) har med baggrund i den øgede dødelighed i de to ovennævnte amerikanske undersøgelser beregnet, at en forøgelse af det gennemsnitlige $PM_{2,5}$-niveau med 10 µg pr. m^3 vil resultere i et fald i den forventede middellevealder på ca. et år for en befolkning med normal vestlig dødelighed. I København svarer det til en forøgelse af den nuværende partikelforurening med ca. 50 %.

Usikkerhed ved vurdering af helbredseffekter

Som det fremgår af det foregående, får vi ikke altid ens eller sammenlignelige resultater i studierne af helbredseffekterne. Det skyldes en række forhold, som er beskrevet i det følgende.

Når man vurderer helbredseffekterne af partikelforurening, er det et generelt problem at bestemme eksponeringen, fordi man almindeligvis antager, at personer inden for et større område på et givent tidspunkt bliver udsat for samme forureningsniveau. Imidlertid bliver vi udsat for forureningen mange andre steder end uden for vores bolig, fx under transport og ophold inden døre. Der er derfor behov for at inkludere information om tids- og aktivitetsmønstre, hvis vi vil have mere sikre resultater.

Der er desuden uafklarede spørgsmål om, hvilke partikler, der har de største betydninger for vores helbred, og hvordan partiklerne virker rent biologisk. Vi mangler også viden om et muligt samspil mellem partikler og andre luftforureningskomponenter som kvælstofdioxid og ozon samt klimatiske forhold. Endeligt er det vigtigt at identificere følsomme grupper i befolkningen.

Næsten al vores viden knytter sig til partikler målt som vægten af PM_{10} eller $PM_{2,5}$. Vi ved fortsat kun lidt om effekten af partiklers indhold af forskellige stoffer, men vi ved dog, at de bærer på en række meget giftige stoffer, og vi regner alle partikler for lige farlige. Derimod har effektstudier af ultrafine partikler kun indgået i meget få befolkningsundersøgelser. Vor viden om de biologiske effekter af ultrafine partikler er uhyre begrænset.

Miljøzonemærke
undtaget
Zone

6 Hvordan kan vi begrænse partikelforureningen?

Forureningen med partikler er grænseoverskrivende. Endvidere stammer partiklerne fra en lang række kilder i hele verden. Det er derfor en meget omfattende opgave at begrænse forureningen, og det kræver både nationale og internationale tiltag.

Foto: Bjarne Jensen.

Luftforureningen med partikler er et alvorligt samfundsproblem med en række skadelige konsekvenser for vores sundhed. Der er derfor en generel holdning blandt befolkningen og politikerne om, at det er nødvendigt at gøre noget for at reducere de skadelige effekter af partiklerne. Dette gælder ikke mindst i de europæiske lande.

Partikler kommer fra et hav af forskellige kilder, hvoraf nogle er lokale, mens andre kilder ligger mere end 1.000 km fra Danmark. Endvidere kan partiklerne stamme fra direkte udledninger (primære partikler), eller de kan være dannet i atmosfæren (sekundære partikler). Det er derfor en omfattende opgave at reducere luftforureningen med partikler, fordi vi skal reducere disse mange kilder. Reguleringen skal ske både på internationalt – og nationalt plan, før den bærer frugt. Heldigvis hænger en række af de forskellige problemer med luftforurening sammen på en sådan måde, at de tiltag, der allerede er foretaget for at begrænse forsuringen af vores skove og tilførslen af næringsstoffer fra luften til vandmiljøet og naturen, også medvirker til at reducere problemerne med luftforureningen med partikler.

I dette kapitel beskriver vi de væsentligste tiltag, som fører til en begrænsning i forureningen med partikler. Vi beskriver både nogle af de tiltag, der allerede er sat i værk, og nogle af de kommende tiltag, som enten er ved at blive forhandlet på plads, eller som forventes at kunne blive anvendt i løbet af en kortere årrække. Da partikler består af så mange forskellige typer, vil vi for overskuelighedens skyld gennemgå de væsentligste reduktionstiltag for hver af de enkelte hovedtyper.

Regulering af partikelforureningen

Reguleringen af partikelforureningen foregår på et internationalt, et regionalt og et nationalt plan. På det internationale og regionale plan sker reguleringen via EU og Konventionen om Grænseoverskridende Luftforurening over Store Afstande (LRTAP) under De forenede Nationers Økonomiske Kommission for Europa (UNECE).

UNECE

Allerede i 1970'erne og 1980'erne erkendte man, at udledningerne af svovldioxid, kvælstofoxider og ammoniak for-

Figur 6-1
FN's bygning i Geneve. De mange flag foran bygningen symboliserer det samarbejde, som er nødvendigt for at løse mange af verdens fælles problemer, herunder problemerne med den grænseoverskridende forurening med partikler.
Foto: Thomas Ellermann.

årsagede skader på naturen og vandmiljøet, og at udledningerne førte til en såkaldt grænseoverskridende luftforurening, hvor udledninger i et land gav skader på naturen og vandmiljøet i et andet land. Arbejdet med den internationale regulering af luftkvaliteten i Europa blev påbegyndt i UNECE med vedtagelsen af Genevekonventionen i 1979, efter at blandt andet forsuring havde vist sig at være et miljøproblem.

Konventionens hensigt er at beskytte miljøet mod forsuring, eutrofiering og direkte effekter på planter, mennesker og dyr samt at afbøde skader på materialer. Genevekonventionen er en såkaldt rammekonvention, der med årene er blevet udvidet til at omfatte i alt 7 protokoller, der bl.a. indeholder mål for reduktioner af udledninger af svovldioxid, kvælstofoxider, ikke-metanholdige flygtige organiske

forbindelser (NMVOC) og ammoniak. Der sker for tiden ikke en direkte regulering af udledningen af partikler, men de fire typer af stoffer medvirker som nævnt i kapitel 2 til dannelsen af sekundære uorganiske og organiske partikler i atmosfæren. Den nyeste protokol – Göteborgprotokollen, der blev vedtaget i 1999 – har til formål at reducere overskridelsen af de kritiske belastninger af forsuring og eutrofiering samt effekten af fotokemisk luftforurening (ozon). I modsætning til de tidligere protokoller er der ikke fastsat mål for reduktionen, men emissionslofter for hvert land. Ved fastsættelse af lofterne har man tilstræbt at reducere overskridelsen af de kritiske lokale belastninger mest muligt, og at reduktionen sker på en måde, som så vidt muligt er økonomisk optimal for de enkelte lande.

Hvis alle 47 lande under Göteborgprotokollen opfylder deres forpligtelser, vil der frem til 2010 ske en reduktion af udledningerne af kvælstofoxider med 41 % og svovldioxid med 63 % i forhold til udledningerne i 1990.

EU

Under EU er der en række direktiver, der regulerer såvel udledningen af luftforurenende stoffer som luftkvaliteten. EU-direktiverne adskiller sig fra konventionerne og protokollerne under UNECE ved, at de er bindende for EU-landene, som dermed har pligt til at gennemføre dem via national lovgivning.

Regulering af luftkvalitet

Reguleringen af luftkvaliteten i EU er fastlagt i et overordnet luftrammedirektiv fra 1996 med tilhørende mere detaljerede såkaldte datterdirektiver. Reguleringen af partikelforureningen indgår i datterdirektivet fra 1999. I dette datterdirektiv er der opstillet grænseværdier for, hvor stor partikelforureningen højest må være i medlemslandene. Disse grænser skal være overholdt alle steder udendørs. Datterdirektivet fra 1999 indeholder også regler og grænseværdier for svovldioxid og kvælstofoxider, som i sig selv kan være skadelige i for høje koncentrationer, og som kan omdannes til sekundære partikler i atmosfæren. EU's direktiver forpligter de enkelte medlemslande til at iværksætte planer, der reducerer partikelforureningen i de områ-

der, hvor der sker overskridelser af grænseværdierne. EU's grænseværdier er overført til dansk lov via en luftbekendtgørelse. Der er to grænseværdier for PM_{10}:

1. Årsmiddelværdien for PM_{10} må ikke være over 40 µg pr. m^3.
2. Døgnmiddelværdien af PM_{10} må kun overskride 50 µg pr. m^3 35 gange om året.

Den første grænseværdi sikrer, at det gennemsnitlige niveau på lang sigt ligger under en passende lav årsmiddelværdi, mens den anden grænseværdi sikrer, at døgnmiddelværdierne kun må blive for høje et vist antal gange om året. Tanken med disse grænseværdier er at beskytte befolkningen mod både langsigtede og akutte sundhedseffekter af partikelforureningen. Grænseværdierne er for nylig blevet revideret i EU, og i den forbindelse er der opstillet grænseværdier for $PM_{2,5}$.

Regulering af udledninger

Reguleringen af udledninger på europæisk plan sker både ved at opstille nationale mål for de totale udledninger i de enkelte lande og ved at fastsætte grænseværdier for udledningen fra specifikke sektorer og anlægstyper.

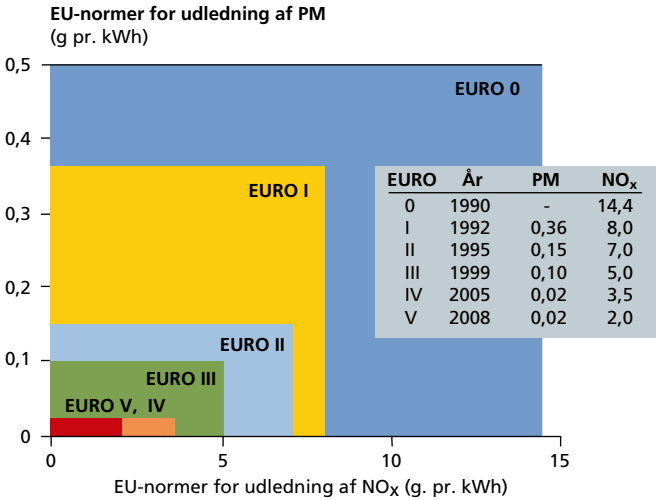
Nogle af de vigtigste EU-direktiver er direktivet om nationale emissionslofter for visse luftforurenende stoffer (NEC), direktivet om begrænsning af visse luftforurenende emissioner fra store fyringsanlæg (LCP) og direktivet om integreret forebyggelse og bekæmpelse af forurening (IPPC). De to sidstnævnte direktiver foreskriver en direkte regulering af udledningerne og er minimumsdirektiver, dvs. at de enkelte medlemslande skal opfylde de skærpede krav i forhold til direktivernes bestemmelser.

NEC-direktivet, der blev vedtaget i 2001, omfatter de samme stoffer som Göteborgprotokollen, og for Danmark og mange andre EU-lande er emissionslofterne i 2010 også ens i direktivet og protokollen. En forlængelse af NEC-direktivet med nye og skrappere krav for 2020 forventes vedtaget i løbet af 2009. Desuden vil det også indeholde krav om reduktion af udledningen af partikler ($PM_{2,5}$).

For vejtrafikken er udledningerne fra udstødningen

Figur 6-2
EU's EURO-normer for udledningen af partikler og kvælstofoxider fra nye, tunge køretøjer. Tabellen viser årene for deres ikraftræden. Partikler fra udstødning er små, mindre end 2,5 µm. Der er en sammenhæng mellem udledning af partikler og kvælstofoxider; derfor reguleres de samtidig i EURO-normerne.

Kilde: European Federation for Transport and Environment.



EURO	År	PM	NO_x
0	1990	-	14,4
I	1992	0,36	8,0
II	1995	0,15	7,0
III	1999	0,10	5,0
IV	2005	0,02	3,5
V	2008	0,02	2,0

reguleret af de såkaldte EURO-normer, som stiller krav til de maksimale udledninger af en række luftforurenende stoffer herunder kvælstofoxider, svovldioxid, flygtige kulbrinter, kulmonoxid og partikler. Figur 6-2 viser et eksempel for udledningen af partikler og kvælstofoxider fra nye tunge køretøjer og årene for deres ikrafttræden. Man har koblet grænseværdier for partikler og kvælstofoxider sammen, fordi man ofte kan regulere dem samtidigt ved teknologiske tiltag. Der findes tilsvarende normer for andre mobile kilder, fx person- og varebiler, motorcykler, knallerter, traktorer, entreprenørmaskiner, fritidsfartøjer og senest for lokomotiver og fartøjer på indre vandveje. Til forskel fra stationære kilder, er reguleringen af mobile kilder totalt harmoniseret, dvs. at medlemslandene ikke kan gå videre, end direktiverne foreskriver.

Slid på bremser og dæk samt støv fra selve vejen er umiddelbart svært at regulere, bl.a. fordi der også er trafiksikkerhedsmæssige aspekter, som man skal tage hensyn til. Derfor er der indtil videre kun foretaget få tekniske reguleringer af disse udledninger, fx forbud mod asbest i bremser.

National regulering

Den nationale regulering af partikler og stoffer, der danner partikler, sker gennem bekendtgørelser, handlingsplaner og vejledninger. Danske bekendtgørelser, der gennemfører

EU-direktiverne i den nationale miljølovgivning, er bl.a. godkendelsesbekendtgørelsen samt bekendtgørelsen om store fyringsanlæg. Godkendelsesbekendtgørelsen implementerer IPPC-direktivet og omfatter en lang række aktiviteter, herunder energiproduktion, affaldsforbrænding samt en række industrielle brancher over en vis størrelse. Grænseværdierne for udledningen er angivet i en række bekendtgørelser – bl.a. i bekendtgørelsen om store fyringsanlæg samt luftvejledningen, der er Miljøstyrelsens vejledning til tilsynsmyndigheden (kommunerne, regionerne eller Staten). Luftvejledningen, der første gang blev udsendt i 1990, er ikke bindende, men myndighederne bør altid tage udgangspunkt i vejledningen, når de stiller krav til virksomheders udledning af stoffer til luften. Vejledningen er et resultat af mange års observationer af luftforureningens forskellige skadevirkninger, der har vist, at det ikke er tilstrækkeligt at fortynde de miljøskadelige stoffer i atmosfæren.

Ud over den direkte regulering af de enkelte kilder er der via den såkaldte kvotebekendtgørelse fra 1991 fastlagt årlige kvoter for den samlede udledning af svovldioxid og kvælstofoxider fra store el-produktionsanlæg over 25 MW_{el}. Denne bekendtgørelse har bevirket, at grænseværdier for udledninger for mange af kraftværkerne i Danmark ligger under de grænseværdier, der er givet i bekendtgørelsen om store fyringsanlæg. En indførelse af afgifter på svovl i 1998 har yderligere betydet, at udledninger af svovl er faldet meget, og at emissionsloftet for 2010 allerede er opfyldt.

I løbet af de seneste 5 - 10 år har der været en øget fokus på betydningen af udledningerne af partikler fra opvarmning af boliger med forskellige former for brændsel. Dette er sket som følge af en lang række nationale og internationale undersøgelser af luftforureningen fra brændeovne, kedler m.m., og i dag er man klar over, at de udgør en væsentlig del af de direkte udledte partikler. I 2007 kom der derfor en dansk bekendtgørelse, som sætter grænser for udledningen af partikler fra nye brændeovne og små brændekedler samt ovne og kedler, der sælges eller overdrages. Myndighederne får desuden mulighed for en bedre regulering i tilfælde af gener i omgivelserne.

Danmark har desuden vedtaget handlingsplaner for miljøbeskyttelse på en lang række områder herunder energi,

Figur 6-3
Vindmøllepark ved Middelgrunden. Handlingsplanen Energi-21 har været med til at øge andelen af vedvarende energi, bl.a. energi fra vindmøller.
Foto: Thomas Ellermann.

transport, affald og landbrug. Eksempler herpå er Energi-21 (figur 6-3) og Vandmiljøhandlingsplanerne, Ammoniakhandlingsplanen og VOC-aftalen med industrien, som har medvirket til reducerede udledningerne af kvælstofoxider, flygtige organiske forbindelser og ammoniak.

En anden måde at regulere udledningerne fra vejtrafikken er via en regulering af trafikken. I 2007 er der blevet vedtaget en lov om oprettelse af miljøzoner i København, Frederiksberg, Odense, Århus og Aalborg som stiller særlige krav til de tunge køretøjer (lastbiler og busser), som må køre inden for miljøzonen. Dog forventer man, at miljøzonerne kun vil resultere i en begrænset reduktion i den samlede partikelforurening ($PM_{2,5}$), fordi der er et ret stort bidrag fra den regionale forurening. Der lægges imidlertid vægt på, at man begrænser den del af forureningen, som stammer fra dieselbilernes udstødning, og som man anser

for at være mest skadelig. Endvidere forventer man en større reduktion af de ultrafine partikler. Lignende tiltag er ved at blive planlagt i de øvrige store byer i Danmark. Senere vil miljøzoner også omfatte andre dieselbiler.

Figur 6-4
Miljømærke. Alle tunge lastbiler og busser over 3,5 tons skal være udstyret med partikelfilter og miljøzonemærkat, hvis de lovligt skal køre i miljøzonen i København.
Foto: Bjarne Jensen.

Effekten af reguleringerne

De seneste årtiers intensive reguleringer af udledninger af partikler og stoffer, der danner partikler, har ført til betragtelige reduktioner i udledningerne.

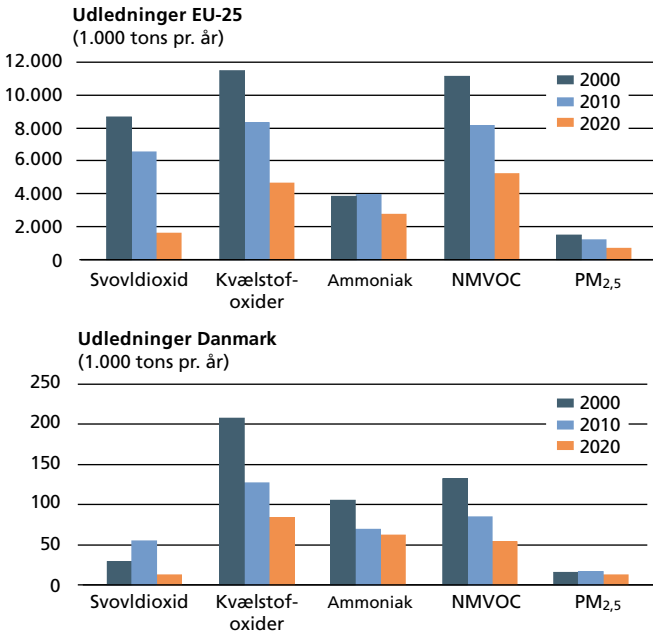
En af de største potentielle kilder til udledning af partikler er kraftværkssektoren. Reguleringen af denne sektor har i mange år været meget effektiv, og siden den allerførste miljøgodkendelse af kulfyrede kraftværker i Danmark, har man stillet krav til rensning af røggassen for partikler. Teknologier, som man anvender til dette, er hovedsagelig elektrostatiske filtre og posefiltre. Hvis man forstillede sig, at de kulfyrede kraftværker ikke havde disse filtre, ville udledningen af partikler (TSP, Total Suspended Particulates) være ca. 750.000 tons pr. år i stedet for de ca. 500 tons pr. år, der rent faktisk udledes. Det vil sige, at der sker en reduktion på mere end 99,9 %.

Kravene til nedbringelse af udledningerne af svovldioxid og kvælstofoxider har betydet en omfattende forskning inden for forbrændingsteknik og udvikling af metoder til rensning af røg. Effektive afsvovlingsanlæg medfører typisk en rensningsgrad på 97 % - 99 %, hvilket, sammen med andre tiltag som fx anvendelse af brændsler med lavere indhold af svovl, har ført til, at udledningen af svovldioxid fra kraftværkssektoren er faldet med mere end 97 % fra 1980 til 2005. For kvælstofoxider har indførslen af bl.a. specielle lav-kvælstofoxid-brændere og selektive katalytiske reaktorer (SCR) betydet en reduktion af kvælstofoxider på 61 % fra 1985 til 2005.

Inden for landbruget har kravene om at reducere udledningerne af ammoniak medført en fortsat forskning og udvikling i nye landbrugsteknikker og etablering af bedre viden om kilderne til udledning af ammoniak. Det har medført, at landbruget i dag er blevet langt bedre til at håndtere kvælstof i husdyrproduktionen, så der ikke udledes nær så meget ammoniak til omgivelserne. Dette er fx sket ved at optimere på indholdet af kvælstof i foderet samt

at forbedre staldsystemerne og måden, som man udbringer husdyrgødning på. De danske udledninger er reduceret med ca. en tredjedel set i forhold til 1990, og det er sket på trods af, at der aldrig har været produceret så mange husdyr, som i dag. Udledningerne af ammoniak fra de øvrige EU-lande er faldet lidt mindre end de danske.

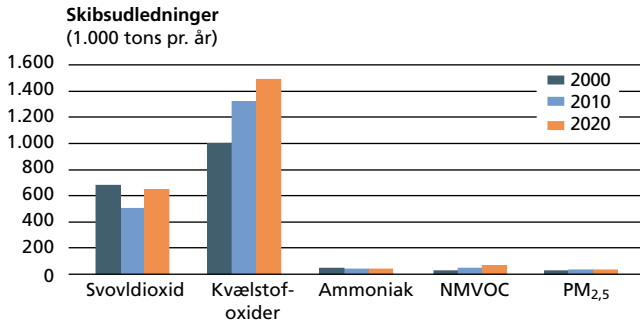
I Göteborgprotokollen og NEC-direktivet er der opstillet krav om at reducere den samlede udledning af ikke-metanholdige flygtige organiske forbindelser, hvilket vil føre til næsten en halvering af udledningerne i Europa i perioden fra 1990 til 2010. Danmark alene har forpligtet sig til en reduktion på 53 %. Disse krav har været medvirkende til den kraftige reduktion i udledningerne, som er sket hidtil. Danmark har således reduceret udledningerne med ca. 30 %, og samlet set har de 15 gamle EU-lande reduceret udledningerne med ca. 53 %. Disse reduktioner har ført til en reduktion i mængden af de såkaldte sekundære organiske partikler. Alt i alt har de mange tiltag for at reducere udledningerne ført til en reduktion af udledningerne i Danmark af svovldioxid på 88 %, kvælstofoxider på 36 %, flygtige kulbrinter på 30 % og ammoniak på 31 % fra 1990 til 2005.



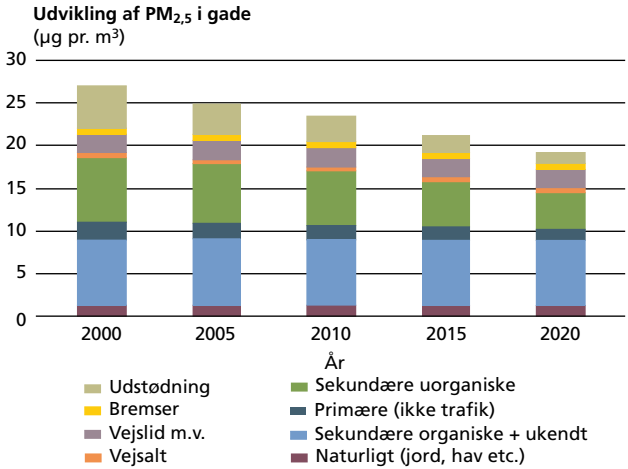
Figur 6-5
Udledninger af svovldioxid (SO_2), kvælstofoxider NO_x), ammoniak (NH_3), ikke-metanholdige flygtige forbindelser (NMVOC) og $PM_{2,5}$ i 2000 og maksimale udledninger (emissionslofter) i 2010 i henhold til NEC-direktivet, samt forslag til maksimale udledninger i 2020 for EU-25 og Danmark. Forslaget til emissionslofter i 2020 er under forhandling i EU.
Kilde: IIASA.

Det kan være svært at vurdere, hvordan det vil se ud i fremtiden, men lige netop på området vedrørende luftforurening er der fra international og national politisk side udstukket retningslinjer for udviklingen. Dette er sket i forbindelse med EU's temastrategi for luftforureningen, som giver en ramme for opstilling af nye nationale emissionslofter for år 2020. Figur 6-5 viser de emissionslofter, som er blevet foreslået af EU for Danmark. Alt peger derfor på, at der fortsat vil ske betydelige reduktioner af udledningerne. Det afhænger dog af, om målsætningerne i temastrategien bliver udmøntet i det kommende nye NEC-direktiv om emissionslofter for år 2020, som er ved at blive forhandlet på plads. Göteborgprotokollen skal også snart revideres, men her er der endnu ikke opstillet forslag til målsætninger.

Mens de nationale udledninger forventes at aftage, ser det mere problematisk ud med hensyn til de internationale skibsudledninger, da man forventer en øget skibstrafik og dermed øgede udledninger af navnlig svovldioxid og kvælstofoxider (figur 6-6). I 2020 forventes skibstrafikken i Østersøen og Nordsøen alene at udgøre henholdsvis 40 % og 30 % af EU-25's samlede nationale udledninger af svovldioxid og kvælstofoxider. Årsagen til de store udledninger af svovldioxid og kvælstofoxider er, at udledninger fra den internationale skibstrafik bliver reguleret inden for den internationale søfartsorganisation (IMO) med basis i MARPOL-konventionen (den internationale konvention om forebyggelse af forurening fra skibe). Denne regulering er langt mindre striks end reguleringen af den nationale skibstrafik. Både i Europa og på globalt plan er der dog kommet mere fokus på problemet med udledningerne fra



Figur 6-6
De forventede ændringer i udledningerne af svovldioxid (SO_2), kvælstofoxider (NO_x), ammoniak (NH_3), ikke metanholdige flygtige organiske forbindelser (NMVOC) og $PM_{2,5}$ fra den internationale skibstrafik i Nordsøen og Østersøen, som i denne sammenhæng omfatter alle de indre danske farvande. 2000 angiver udledningerne i år 2000. 2010 og 2020 angiver de forventede udledninger ifølge EMEP.
Kilde: EMEP.



Figur 6-7
Forventet ændring i $PM_{2,5}$ i en trafikeret gade i København. Tilsvarende ændringer forventes også for trafikerede gader i de andre større danske byer. Det skal bemærkes, at det naturlige bidrag og bidraget fra sekundære organiske partikler er antaget konstant i denne figur. De sekundære organiske partikler forventes reduceret som følge af reguleringer, men det er ikke muligt, med den viden vi har i dag, at vurdere hvor meget.
Kilde: DMU.

skibene, og det kan derfor forventes, at der vil blive sat mere effektive tiltag i gang for at mindske udledningerne betragteligt i fremtiden, således at det ikke går som forventet ud fra dataene i figur 6-6. En ny regulering af den internationale skibsfart og luftfart er endvidere undervejs inden for EU.

På basis af de forventede udviklingstendenser for udledninger af gasser og primære partikler kan vi lave et skøn over, hvordan vi forventer, at partikelforureningen vil ændre sig frem til år 2020. Figur 6-7 viser vores bedste skøn for udviklingen i $PM_{2,5}$-koncentrationen, som er den mest interessante set i relation til vores sundhed. Fra 2005 til 2020 forventer man således en reduktion i $PM_{2,5}$ på ca. 20 %, hvilket forventes at give en tydelig reduktion i sygelighed relateret til partikelforureningen. De 20 % er oven i købet et rimeligt forsigtigt skøn, idet man ikke har medregnet en reduktion i de sekundære organiske partikler på trods af, at man forventer en mærkbar reduktion i udledningerne af flygtige kulbrinter. Der vil formodentligt ske et fald, men da vores viden om de sekundære organiske partikler endnu ikke er så detaljeret, kan vi ikke skønne, hvor stort faldet vil blive.

Skibstrafik er en væsentlig kilde til partikelforurening.

Foto: Britta Munter.

deutsch
english

7

Ved vi nok, og er der nye trusler?

Der foreligger en omfattende viden om partikler, som vi allerede i dag anvender til at regulere luftforurening med partikler. Der er dog stadig en del områder, hvor vi mangler viden om partikel-forureningen.

Foto: © Europa-Parlamentet - Enheden for Audiovisuelle Medier.

Ved vi nok?

Der er ingen tvivl om, at luftforurening med partikler er et alvorligt helbredsproblem i store dele af verden og i Danmark. Det til trods for, at vi de seneste år har gjort meget for at begrænse luftforureningen både gennem internationale aftaler, specielt inden for EU, og ved en effektiv regulering af udledninger specielt fra fyringsanlæg og industrier. I Danmark får vi en stor del af partikelforureningen fra de øvrige europæiske lande, og derfor er reduktionstiltag inden for EU meget væsentlige for Danmark. Men vi har stadig væsentlige lokale problemer med fx partikelforureningen fra vejtrafikken og fra brændeovne, selv om der er sat nye lokale reguleringer i værk i form af miljøzoner i byerne og en bekendtgørelse om brændeovne. Men alle reguleringerne tager tid, før de får den ønskede virkning.

Til trods for at vi ved, at der er en klar forbindelse mellem partikelforureningen og sundhedsskader, ved vi ikke, hvilke dele af partikelforureningen der giver de alvorligste skader. Vi ved, at partiklernes form, størrelse og evne til at optage fx vand er af stor betydning for, hvor de sætter sig i vore luftveje. Men er det partiklernes indhold af farlige stoffer, fx PAH'er, tungmetaller, oxidanter, syrer m.v., eller er det deres blotte tilstedeværelse og irritation af vores luftveje, der er afgørende? Vi har i dag ikke et svar på disse spørgsmål, men det er sandsynligvis en kombination af disse mekanismer, der giver anledning til helbredsskader af forskellig art. De fleste undersøgelser tyder dog på, at det er de fine partikler fra forbrænding, som spiller den største rolle for helbredsskader. Det er derfor vigtigt, at vi hele tiden søger ny viden om, hvilke dele af partikelforureningen der er mest skadelig, så vi kan reducere sundhedsskaderne mest effektivt.

Fordi vores viden ikke er tilstrækkelig, har man indtil videre lavet indgreb for at begrænse partikelforureningen over en bred front og antaget, at alle partikler er lige farlige. Det er fx sket under den såkaldte temastrategi for luftforurening, som EU-Kommissionen har foreslået. Man har især fokuseret på de sekundære uorganiske partikler, som fører til dannelse af ammoniumsulfat og ammoniumnitrat, og kun i ringe grad på partikler fra forbrænding og de sekundære organiske partikler. Men er det rigtigt, at fx vandopløselige ammoniumsalte, der udgør en meget stor del af

partikelforureningen i Europa (herunder Danmark), er ligeså farlige som partikler fra udstødningen fra dieselkøretøjer og PAH- og dioxinholdige røgpartikler fra forbrænding? Der arbejdes intenst mange steder i verden på at klarlægge dette, både ved at skaffe gode data om partiklerne og deres kilder og om partiklernes virkningsmekanismer på helbredet. Også forskningen i Danmark bidrager hertil.

For at skaffe et bedre grundlag for beslutninger, der kan føre til færre sundhedsskader som følge af partikelforureningen, kræver det forbedringer af vores viden på en række områder, bl.a.:

- Indsamling af detaljerede partikeldata, som indeholder information om partiklernes størrelse, deres fysiske egenskaber og kemiske sammensætning, og som kan beskrive partiklernes dannelse, omdannelse og spredning i atmosfæren. I de generelle luftmåleprogrammer indsamles kun data om mængden af partikler, fx PM_{10}, $PM_{2,5}$ eller sod.
- Avancerede studier af sammenhængen mellem detaljerede partikeldata og sundhedsskader.
- Udbygning af luftkvalitetsmodeller, så de omfatter alle væsentlige partikelparametre (som nævnt ovenfor) og er baseret på gode og detaljerede data om udledninger af partikler og stoffer, der kan danne partikler, for herigennem at kunne vurdere befolkningens eksponering for de forskellige dele af partikelforureningen.
- Gennemførelse af specifikke laboratoriestudier af sundhedseffekterne af partikler.
- Fortsat udbygning af det internationale samarbejde, da Danmark ikke kan løse problemet isoleret.

Nye trusler

Et område, som kun er meget lidt omtalt i denne bog, er partiklernes påvirkning af klimaet og det globale miljø og dermed også på vores helbred. Partikler har både en direkte og en indirekte effekt på klimaet. Den direkte effekt skyldes, at partikler spreder solens indkommende lys, og den indirekte effekt skyldes, at høje koncentrationer af partikler forårsager skydannelser. Skyer kan både have en kølende og en opvarmende effekt på klimaet afhængigt af, hvor højt

de befinder sig. Generelt er partiklers rolle i forbindelse med klimaet kendt, men i det internationale klimapanels (IPCC) seneste rapport fremgår det, at partiklers effekt på klimaet er forbundet med store usikkerheder. For at kunne forudsige fremtidens klima er det derfor meget vigtigt at få bedre styr på den sammenhæng, der er mellem klima og partikler. Dette vedrører ikke alene forståelsen af de processer, der fører til dannelsen af partiklerne, men også

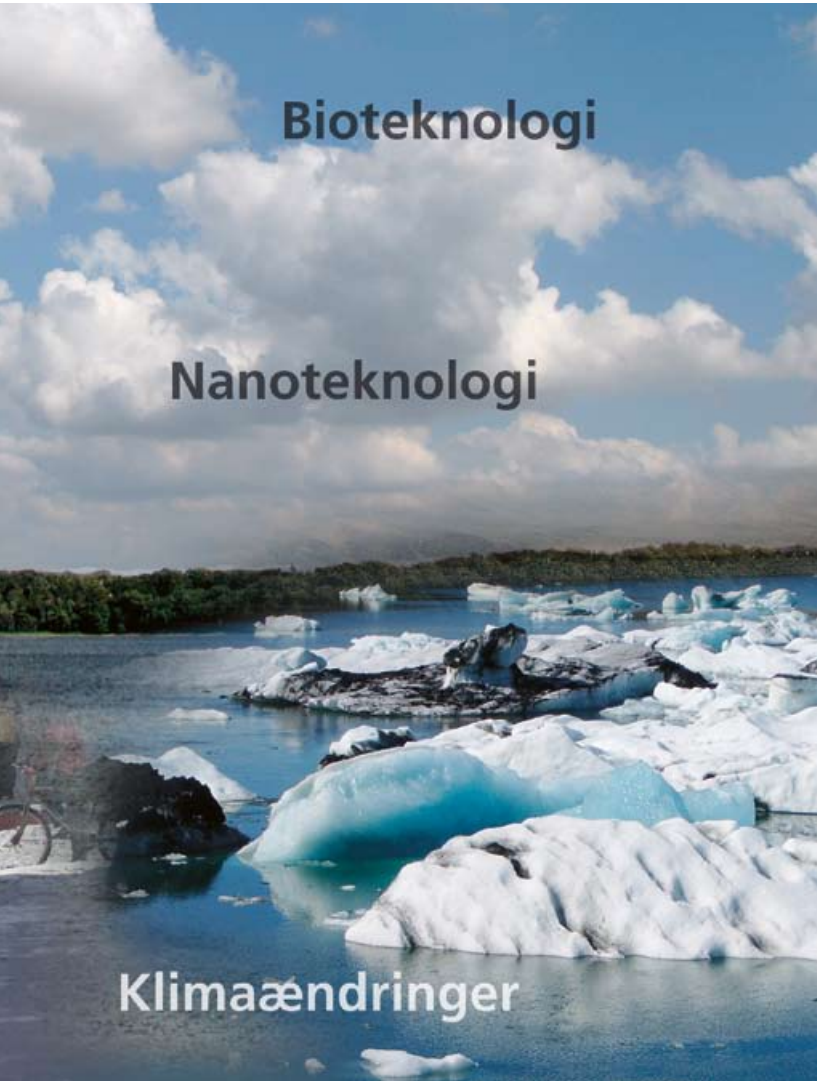


Foto: Finn Palmgren og Britta Munter.

viden om, hvilke stoffer, der bliver udledt til atmosfæren i fremtiden fx fra energisektoren.

Endelig kan nye teknologier formentlig føre til dannelse og udledninger af andre typer af partikler. Der er således mistanke om, at nanoteknologi eller nye teknologier i bilindustrien kan føre til dannelse af helt nye typer af partikler. Derfor er det også vigtigt at overvåge denne udvikling både direkte i forbindelse med udviklingen og i miljøet.

Litteratur

Kapitel 1

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

Kapitel 2

Glasius, M., Wåhlin, P. & Palmgren, F. (2005). – Ny viden om partikler fra brændeovne og vejtrafik i Danmark. – Miljø og sundhed 27: 10-16.

Palmgren, F., Glasius, M., Wåhlin, P., Ketzel, M., Berkowicz, R., Jensen, S.S., Winther, M., Illerup, J.B., Andersen, M.S., Hertel, O., Vinzents, P.S., Møller, P., Sørensen, M., Knudsen, L.E., Schibye, B., Andersen, Z.J., Hermansen, M., Scheike, T., Stage, M., Bisgaard, H., Loft, S., Lohse, C., Jensen, K.A., Kofoed-Sørensen, V. & Clausen, P.A. (2005). – Luftforurening med partikler i Danmark. Miljøstyrelsen. – Miljøprojekt 1021. 84 s.

Palmgren, F., Wåhlin, P., Berkowicz, R., Ketzel, M., Illerup, J. B., Nielsen, M., Winther, M., Glasius, M. and Jensen, B. (2003). Aerosols in Danish Air (AIDA). Mid-term report 2000-2002. National Environmental Research Institute, Roskilde, Denmark. – NERI Technical Report No. 460. 94 pp.

Wåhlin, P., Palmgren, F. & Glasius, M. (2004). – Luftbårne partikler og sundhed – Hvilke partikler? – Miljø og sundhed 24: 3-10.

Wåhlin, P. & Palmgren, F. (2004). – Partikler i luften i København. Miljøkontrollen, Københavns Kommune. 24 s.

Kapitel 3

Glasius, M., Nielsen, P.K., Stubkjær, J., Bossi, R., Hertel, O., Ketzel, M., Wåhlin, P., Schleicher, O. & Palmgren, F. (2007). – Partikler og organiske forbindelser fra træfyring – nye undersøgelser af udslip og koncentrationer. Danmarks Miljøundersøgelser, Aarhus Universitet.– Arbejdsrapport fra DMU 235. 41 s.

Illerup, J.B., Nielsen, O.K., Winther, M., Mikkelsen, M.H., Hoffmann, L., Nielsen, M., Gyldenkærne, S., Fauser, P., Jensen, M.T. & Bruun, H.G. (2007). – Annual Danish Emission Inventory Report to UNECE – Inventories from the base year of the protocols to year 2005. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. – NERI Technical Report 649. 182 pp.

Illerup, J.B., Henriksen, T.C., Lundhede, T., van Breugel, C. & Jensen, N.Z. (2007). – Brændeovne og små kedler – partikelemissioner og reduktionstiltag. Miljøstyrelsen. – Miljøprojekt 1164. 46 s.

Illerup, J.B. & Nielsen, M. (2004). – Halvdelen af udslippet af små partikler stammer fra brændefyring. – DMUNyt 8(19): 1-3.

Illerup, J.B. & Nielsen, M. (2004). – Improved PM emissions inventory for residential wood combustion. Pp 142-149 in: Dilara, P., Muntean, M., & Angelino, E. (eds): Proceedings of the PM Emission Inventories Scientific Workshop, Lago Maggiore, Italy, 18 October 2004. European Commission. – EUR 21302.

Winther, M. (2007). – Danish emission inventories for road transport and other mobile sources. Inventories until year 2004. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. – NERI Research Notes 236. 204 pp.

Kapitel 4

Hertel, O., Jensen, S. S., Hvidberg, M., Ketzel, M., Berkowicz, R., Palmgren, F., Wåhlin, P., Glasius, M., Loft, S., Vinzents, P., Raaschou-Nielsen, O., Sørensen, M., & Bak, H. (2008). – Assessing the Impacts of Traffic Air Pollution on Human Exposures and Linking Exposures to Health Effects. Pp 277 – 299 in: Jensen-Butler, C., Sloth, B., Larsen, M.M., Madsen, B. & Nielsen, O.A. (eds): Traffic, road pricing and the environment. Advances in spatial Science. Springer-Verlag Berlin Heidelberg. 425 pp.

Hertel, O., Hvidberg, M., Ketzel, M., Jensen, S.S., Stausgaard, L., & Madsen, P.V. (2008). – Selection of green route through the city (In Danish: Valg af grøn rute gennem byen). – Miljø og sundhed 1: 3-6.

Hertel, O., Jensen, S.S., Hvidberg, M., Brocas, M., Berkowicz, R., Loft, S., Sørensen, M., & Raaschou-Nielsen, O. (2003). – Modelberegning af luftforurening – sammenligning med målte eksponeringer. – Miljøforskning 55: 12-14.

Hvidberg, M., Brocas, M., Jensen, S.S., Hertel, O., Loft, S., Sørensen, M., & Raaschou-Nielsen, O. (2003). – Modelling af luftforurening i det personnære miljø. – Miljøforskning 57: 26-29.

Loft, S., Raaschou-Nielsen, O., Hertel, O. & Palmgren, F. (2003). – Sundhedsmæssige effekter af partikulær luftforurening. Helbredseffekter af luftforurening. Temanummer om partikulær luftforurening i udemiljø – partikulær luftforurening i indemiljø. – Miljø og sundhed 9 (Suppl. 2): 13-19.

Loft, S., Sørensen, M., Knudsen, L.E., Møller, P., Autrup, H., Dragsted, L., Wallin, H., Raaschou-Nielsen, O., Hertel, O., Jensen, S.S., Andersen, H.V. & Nielsen, I.V. (2003). – Individuel udsættelse for luftforurening i København. Helbredseffekter af luftforurening. Temanummer om partikulær luftforurening i udemiljø – partikulær luftforurening i indemiljø. – Miljø og sundhed 9 (Suppl. 2): 20-23.

Raaschou-Nielsen, O., Loft, S., Andersen, A. M., Hertel, O., Jensen, S.S., Hvidberg, M., Bisgaard, H., & Olsen, S.F. (2003). – Luftforurening og helbredseffekter tidligt i livet. – Miljøforskning 57: 34-37.

Kapitel 5

Beelen, R, Hoek, G., van den Brandt, P.A., Goldbohm, R.A., Fischer, P., Schouten, L.J., Jerrett, M., Hughes, E., Armstrong, B. & Brunekreef, B. (2008). – Long-term effects of traffic-related air pollution on mortality in a Dutch cohort (NLCS-AIR study). – Environmental Health Perspectives 116(2): 196-202.

Brunekreef, B. & Holgate, S.T. (2002). Air pollution and health. – Lancet 360: 1233-1242.

CAFE (2005). CAFE CBA: Baseline Analysis 2000 to 2020. – A service contract for the European Commission DG Environment. AEAT/ED51014/Baseline Scenarios. Issue 5.

Dockery, D.W., Pope, C.A. III, Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris, B.G. Jr. & Speizer, F.E. (1993). – An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. – The New England Journal of Medicin 329: 1753-1759.

Götschi T., Heinrich, J., Sunyer, J. & Künzli, N. (2008). – Long-term effects of ambient air pollution on lung function: a review. – Epidemiology 19(5): 690-701.

Mills, N.L., Törnqvist, H., Robinson, S.D, Gonzalez, M.C., Söderberg, S., Sandström, T., Blomberg, A., Newby, D.E & Donaldson, K. (2007). – Air pollution and atherothrombosis. – Inhalation Toxicology 19 (Suppl. 1): 81-89.

Møller, P., Folkmann, J.K., Forchhammer, L., Bräuner, E.V, Danielsen, P.H, Risom, L. & Loft, S. (2008). – Partikulær luftforurening, oksidativ beskadigelse af DNA og risiko for udvikling af kræft. – Miljø og sundhed 14(2): 3-10.

Palmgren, F., Glasius, M., Wåhlin, P., Ketzel, M., Berkowicz, R., Jensen, S.S., Winther, M., Illerup, J.B., Andersen, M.S., Hertel, O., Vinzents, P.S., Møller, P., Sørensen, M., Knudsen, L.E., Schibye, B., Andersen, Z.J., Hermansen, M., Scheike, T., Stage, M., Bisgaard, H., Loft, S., Lohse, C., Jensen, K.A., Kofoed-Sørensen, V. & Clausen, P.A., (2005). – Luftforurening med partikler i Danmark. Miljøstyrelsen. – Miljøprojekt 1021. 84 s.

Pope, C.A. III, Burnette, R.T., Thun, M.J., Calle, E.E., Krewski, D., Ito, K. & Thurston, G.D. (2002). – Lung cancer, cardiopulmonary mortality and long-term exposure to fine particulate air pollution. – The Journal of the American Medical Association 287: 1132-1141.

Pope, C.A. III, Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S., Speizer, F.E. & Heath C.W. Jr. (1995). – Particulate air pollution as a predictor of mortality in a prospective study of U.S. adults. – American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine 151(3): 669-674.

Raaschou-Nielsen, O., Palmgren, F., Solvang Jensen, S., Wåhlin, P., Berkowicz, R., Hertel, O. Vrang, M.-L. & Loft, S. (2002). – Helbredseffekter af partikulær luftforurening i Danmark – et forsøg på kvantificering. – Ugeskrift for Læger 34: 3959-3963.

Stölzel, M., Breitner, S., Cyrys, J., Pitz, M., Wölke, G., Kreyling, W., Heinrich, J., Wichmann, H.E. & Peters, A. (2007). – Daily mortality and particulate matter in different size classes in Erfurt, Germany. – Journal of Exposure science & Environmental Epidemiology 17(5): 458-467.

Trafikministeriet (2003). – Partikelredegørelse 2003. Bilag 2: Vurdering af partikelforureningens og dieselpartiklers sundhedsskadelige effekter. Miljøministeriets og Sundhedsstyrelsens arbejdsgruppe for udendørs luftforurening. 34 s.

World Health Organization (2005). – Effect of air pollution of children's health and development. A review of the evidence. Report No.: E86575.

Kapitel 6

Aas, W., Bruckmann, P., Derwent, R., Poisson, N., Putaud, J-P., Rouil, L., Vidic, S. & Yttri K.-E. (eds.). (2007). – EMEP Particulate Matter Assessment Report. 370 pp.

Kemp, K., Ellermann, T., Brandt, J., Christensen, J., Ketzel, M. & Jensen, S.S. (2008). – The Danish Air Quality Monitoring Programme. Annual Summary for 2007. National Environmental Research Institute, University of Aarhus. – NERI Technical Report No. 681. 47 pp.

Palmgren, F., Berkowicz, R. & Fogh, C.L. (2005). – Vurdering af konsekvenserne af indførelse af forskellige typer af miljøzoner i København. Danmarks Miljøundersøgelser. – Arbejdsrapport fra DMU 222. 24 s.

www.dmu.dk/Luft/

www.emep-emissions.at/emission-data-webdab/

Anbefalet til videre læsning

Palmgren, F., Glasius, M., Wåhlin, P., Ketzel, M., Berkowicz, R., Jensen, S.S., Winther, M., Illerup, J.B., Andersen, M.S., Hertel, O., Vinzents, P.S., Møller, P., Sørensen, M., Knudsen, L.E., Schibye, B., Andersen, Z.J., Hermansen, M., Scheike, T., Stage, M., Bisgaard, H., Loft, S., Lohse, C., Jensen, K.A., Kofoed-Sørensen, V. & Clausen, P.A. (2005). Luftforurening med partikler i Danmark. Miljøstyrelsen – Miljøprojekt 1021. 84 s.

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

www.dmu.dk/Luft/

www.mst.dk/Luft/Partikelforurening/

www.mst.dk/Luft/Regulering+af+luftkvalitet/

Ordliste

Allergen: Et stof, der fremkalder en allergisk reaktion (overfølsomhed).

Ammoniak: NH_3, en luftart (gas), som er meget letopløselig i vand (salmiak).

Ammonium: NH_4^+, en kvælstofforbindelse, der indgår som en positiv ion i salte. Ammonium kan uden brug af energi omdannes til gassen ammoniak, NH_3.

Ammoniumnitrat: NH_4NO_3, et salt, der er dannet af ammoniak og salpetersyre.

Ammoniumsulfat: $(NH_4)_2SO_4$, et salt, der er dannet af ammoniak og svovlsyre.

Asbest: Et mineral, der bl.a. består af magnesium, aluminium, jern, calcium og silicium. Har en trådet struktur. Kræftfremkaldende.

Atmosfære: Luften omkring Jorden.

Alveole: Lungeblære dybest i lungerne, hvor ilt og kuldioxid udveksles med blodet.

Biomarkør: Indikator for eksponering med et sundhedsskadeligt stof, fx mængden af et stof eller effekten af forurening målt i blodprøver eller urin.

Biomasse: Vægten af organismer / organisk materiale i et bestemt område, enten rumfang eller areal. Biomasse i form af træ og halm er betydningsfulde kilder til 'CO_2-neutral' energi.

Bitumen: Bestanddel af råolie. Fremkommer som tyktflydende eller fast restfraktion efter olieraffinering. Anvendes bl.a. i produktion af asfalt.

Bronkitis: Betændelse i slimhinderne i bronkierne.

Diffusion: Spredning eller blanding som følge af molekylers egne bevægelser.

Dioxin: Dannes utilsigtet ved forbrændingsprocesser og ved forskellige industrielle processer, når klor og organiske stoffer er til stede samtidigt. Den vigtigste kilde er affaldsforbrænding. Skovbrande regnes for en naturlig kilde til dioxiner.

Drivhuseffekt: Betegnelse for det fænomen at drivhusgasser i atmosfæren absorberer Jordens varmeudstråling, hvorved temperaturen på Jorden stiger.

Drivhusgas: Luftformige forbindelser i Jordens atmosfære. De er i stand til at opsuge varmestråling. Nogle af de vigtigste er kuldioxid (CO_2), CFC-gasser, kvælstofoxider (NO_x), metan (CH_4) og ozon (O_3). Den vigtigste af alle drivhusgasser er vanddamp.

Elektrostatisk filter: Filter, der renser luften for partikler. Ved hjælp af højspænding i filteret bliver partiklerne i luften opladet, hvorefter de ladede partikler bliver opsamlet på en plade med modsat ladning.

Emission: Udsendelse/udledning af forurenende stoffer i fast, flydende eller gasformig tilstand.

Flygtige organiske forbindelser: Volatile organic compounds (VOC). Fællesbetegnelse for flere grupper af organiske, tyndtflydende, letfordampelige væsker, bl.a. kulbrinter, alkoholer, ethere, estere m.fl., som findes i motorbrændstoffer og også anvendes som opløsnings- og fortyndingsmiddel i visse farver, lakker og lime samt afvaskere.

Fotokemisk luftforurening: Luftforurening med nedsat sigtbarhed, der stammer fra en kemisk reaktion mellem kulbrinter, kvælstofoxider (NO_x) og atmosfærens ilt under indflydelse af sollys. Kaldes også for fotokemisk smog.

Geografisk informationssystem: Forkortes GIS. EDB-system til lagring, behandling, analyse og præsentation af geografiske informationer.

Gigajoule: 1.000.000.000 Joule, hvilket også skrives 10^9 J.

Grænseværdi: Det højst tilladte indhold af et givet stof i fx fødevarer, drikkevand eller luft.

Hydrogensulfit: HSO_3^-, en svag syre.

Hydroxylradikal: Reaktiv OH•-radikal med uparret elektron, der doneres til andre molekyler.

Iltradikal: Delvis reduceret ilt, fx superoxid O_2^-, med uparret elektron, der doneres til andre molekyler.

Impaktion: Når partikler i luften føres mod overfladen og fæstner sig der.

Katalysator: Stof, der forøger reaktionshastigheden i en kemisk proces uden selv at indgå eller forbruges i processen. I biler bruges i dag katalysatorer, hvor platin og rhodium opvarmes af udstødningsgasserne og herved fremmer delingen af kvælstofoxider til frit kvælstof og ilt/vand og kulbrinter samt kulmonoxid til kuldioxid og vand.

Kilde: Oprindelse (årsag) til forurening, fx trafik, landbrug osv.

Klor: Grundstof, kemisk betegnelse Cl. Bruges til at blege eller desinficere, indgår i talrige kemiske forbindelser.

Kohorte: En afgrænset mængde af mennesker, der følges i helbredsundersøgelser.

Kondensat: Væskeformet restprodukt, der dannes ved kondensation, fx i forbrændingsmotorer.

Kondensation: Fortætning. Vanddamp eller andre gasformige luftforureninger kan afsættes på overfladen af partikler i luften, så partiklernes diameter bliver større.

Kulbrinter: Gruppe af organiske stoffer, som indeholder kulstof og brint, fx benzin. Betegnes også hydrocarboner.

Kulhydrater: Stor gruppe af organiske stoffer, der kan oplagre energi. Dannes primært af planter og alger ved fotosyntese. I fotosyntesen omdannes kuldioxid og vand, ved hjælp af energi fra sollys, til kulhydrater.

Kuldioxid: CO_2, klar lugtløs gas. Dannes ved forbrænding af organisk materiale, fx olie, træ og kul. Vigtig drivhusgas.

Kulmonoxid: CO, klar lugtløs gas. Giftig. Dannes ved ufuldstændig forbrænding bl.a. i forbrændingsmotorer i biler. Betegnes også som kulilte.

Kulstof: Grundstof, kemisk betegnelse C. Vigtig bestanddel i alt organisk materiale.

Kvarts: SiO_2, meget almindeligt mineral. En hovedbestanddel af sandsten, kvartsit og granit.

Kvælstofdioxid: NO_2, gasart. Kvælstofdioxid omsættes til salpetersyre i atmosfæren og medvirker dermed til sur nedbør. Sundhedsfarlig i høje koncentrationer. Andre betegnelser er nitrogendioxid eller kvælstoftveilte.

Kvælstofmonoxid: NO, farveløs gasart. I almindelig luft reagerer kvælstofmonoxid hurtigt med ozon i luften og danner kvælstofdioxid. Andre betegnelser er nitrogenmonoxid eller kvælstofilte.

Luftkvalitet: Luftens kvalitet målt fx som koncentrationen af et stof, typisk angivet som µg pr. m^3 (µg stof per kubikmeter luft) eller ppb.

Kvælstofoxider: NO_x, summen af kvælstofmonoxid og kvælstofdioxid.

Magnesium: Grundstof, kemisk betegnelse Mg. Et sølvblankt, let og stærkt metal.

Mikrometer: En 1.000.000'ende del af en meter. Forkortes µm.

Mineral: Uorganisk, kemisk forbindelse, der findes i naturen, og som er dannet ved geologiske processer. Næsten alle mineraler har en krystalstruktur.

Molekyle: Den mindste enhed et stof kan deles i uden at miste sine kemiske og fysiske egenskaber.

Nanometer: En 1.000.000.000'ende del af en meter. Forkortes nm.

Natrium: Grundstof, kemisk betegnelse Na. Et blødt, sølvskinnende og kemisk meget reaktionsvilligt metal.

Natriumklorid: NaCl, salt der bruges i husholdningen, primært til madlavning. Findes også i havvand.

Nitrat: NO_3^-, kvælstofforbindelse, der indgår som en negativ ion i salte. Kan dannes ved oxidation af ammoniak, ammonium eller ved kemiske reaktioner med kvælstofdioxid i atmosfæren. Fører til dannelse af ammoniumnitrat. Nitrater er næringssalte, der kan fremme vækst af planter i næringsfattige områder eller alger i havvand (iltsvind).

Nukleation: En sammensmeltning af molekyler på gasform, hvorved der dannes partikler.

Oliekoks: Kulstofholdigt materiale, der frembringes i forbindelse med raffinering af råolie eller afbrænding af fyringsolie.

Organisk stof: Kemiske forbindelser, hvis hovedbestanddel er kulstof.

Organisk syre: En serie af kemiske forbindelser, fx eddikesyre, der er karakteriseret ved at indeholde en carboxylsyregruppe (-COOH). Benævnes også carboxylsyre.

Oxidant: Et stof, der er i stand til at oxidere et substrat.

Ozon: Ilt findes i luftform som molekyler af sammensætningen O_2, men ved kraftige, elektriske udladninger eller ved påvirkning af ultraviolet lys, herunder fotokemiske processer, kan der dannes ozon, O_3 (med 3 iltatomer i hvert molekyle).

PAH: Forkortelse for polycykliske aromatiske hydrocarboner, også kaldet polyaromatiske kulbrinter. PAH indeholder stabile kemiske ringsystemer. PAH opstår ved ufuldstændig forbrænding, fx fra trafik, fyringsanlæg og tobak og findes i visse former for tjære. Visse PAH'er er kræftfremkaldende.

$PM_{2,5}$: Den del af luftens partikler, som er mindre end 2,5 µm i diameter. PM er en forkortelse for Particulate Matter.

PM_{10}: Den del af luftens partikler, som er mindre end 10 µm i diameter. PM er en forkortelse for Particulate Matter.

Protokol: En protokol er i denne sammenhæng en bog eller lignende med skriftlige optegnelser over forløbet og resultatet af en forhandling, fx Göteborgprotokollen.

Røggas: Gas fra forbrænding af fossile brændsler som olie, naturgas og kul, samt biobrændsler som træ, halm og affald.

Salpetersyre: HNO_3, gasformig, farveløs og stærkt ætsende syre.

Salt: Kemisk forbindelse mellem en kation (positiv ion), fx en metalion og en anion (negativ ion), syrerest.

Sedimentation: Afsætning af partikler pga. tyngdekraften.

Smog: Sammentrækning af de engelske ord "smoke" (røg) og "fog" (tåge). Smog blev først omtalt under en alvorlig forureningsepisode i London i 1952.

Sod: Små sorte partikler, hovedsagligt bestående af kulstof, der opstår ved ufuldstændig forbrænding af kul, olie, træ eller andre brandbare materialer.

Sukkerstoffer: Se kulhydrater.

Sulfat: SO_4^{2-}, svovlforbindelse, der indgår som negativ ion i salte. Dannes ved oxidation af svovldioxid i atmosfæren og fører til dannelse af svovlsyre og sulfatsalte, fx ammoniumsulfat.

Svovldioxid: SO_2, dannes bl.a. forbrænding af svovlholdigt brændsel, fx kul.

Svovlsyre: H_2SO_4, farveløs uorganisk syre. En væske med et kogepunkt på ca. 330 grader.

Syre: Stof, der kan afgive en proton (brintkerne, brintion).

Terpener: En gruppe af naturligt forekommende kulstofforbindelser, der primært stammer fra planter. Udgør hovedbestanddelen af æteriske olie i planter.

Tjærestof: En samlebetegnelse af kemisk beslægtede organiske stoffer, bl.a. polycykliske aromatiske forbindelser.

TSP: Forkortelse for svævestøv som er luftbåret støv. På engelsk total suspended particulate matter.

Tungmetal: Metal, som er tungere end jern, dvs. at det har en større vægtfylde end 5 g pr. ml.

Stikordsregister

A

Afsvovlingsanlæg • 48
AirGIS • 66, 67
Albanigade • 58
Alveoler • 73, 74, 75
Ammoniak • 17, 20, 21, 36, 46, 47, 60, 91, 92, 93
Ammoniakhandlingsplanen • 90
Ammonium • 60
Ammoniumnitrat • 21, 46
Ammoniumsulfat • 20, 21, 46
Anholt • 59
Asbest • 74, 88
Astma • 73, 74, 77, 78

B

Baggrundsovervågningsprogrammet (BOP) • 59
Biomarkører • 75
Bitumen • 30
Blodpropper • 73, 75, 78
Bly • 30
BOP • 59
Bronkier • 25, 73, 74
Bronkitis • 73, 74
Brændeovne, udledning fra • 18, 30, 37, 38, 40, 41, 55, 61, 62
Brændeovnskvarter • 54
Brændselsforbrug • 38, 39, 40
Busser, udledning fra • 43
Bybaggrundskoncentration • 54

D

Danmark, udledning fra • 92
Dieselkøretøjer, udledning fra • 17, 22, 27, 30, 44
Diffusion • 23, 24
Dioxiner • 30, 40
DNA-skader • 75
Drivhusgasser • 40
Dødelighed • 72, 78, 79, 80

E

Eksponering • 66
Elektrostatiske filtre • 41, 42
EMEP • 65
Emissionslofter • 36, 87, 92
Energi-21 • 90
Energiproduktion, udledning fra • 46
Engis, luftforurening • 12
EU • 84, 86
udledning fra • 92
EURO-normer • 43, 44, 45, 88
Europa • 65, 92
udledning fra • 46, 47, 48, 49, 64
Europæiske overvågnings- og vurderingsprograms (EMEP) • 65

F

Filtermetoder • 29
Filterpack-opsamler • 59
Fine partikler • 16, 26, 27, 28
helbredseffekter • 75, 76
koncentrationer • 60
Fjernvarmeværker, udledning fra • 37
Flygtige organiske forbindelser (VOC) • 10, 17, 20, 46, 50
Flytrafik, udledning fra • 39
Forbrændingsanlæg, udledning fra • 22, 37
Forenede Nationers Økonomiske Kommission for Europa (UNECE) • 36, 84
Fotokemisk luftforurening • 86
Frederiksborg • 59
Frie iltradikaler (ROS) • 75
Fyringsvaner • 42

G

Gasfyr, udledning fra • 62
Genevekonventionen • 85
Geografiske informationssystemer (GIS) • 66
Godkendelsesbekendtgørelsen • 89
Grove partikler • 16, 26, 27, 28
helbredseffekter • 75
koncentrationer • 60
Grænseværdier • 58, 87
Gundsømagle • 62
Göteborgprotokollen • 86, 92

H

H. C. Andersens Boulevard • 56, 58, 60, 61
H. C. Ørsted Instituttet • 57, 58, 61
Hansted • 59
Havsalt • 60
Helbredseffekter • 72
Hjerte-kar-sygdomme • 79

Hjertesygdomme • 74, 78
Husdyrgødning • 46, 48
Husholdninger, udledning fra • 37, 38, 39
Hydroxylradikal • 21
Høje kilder • 54

I

Ikke metanholdige flygtige organiske forbindelser (NMVOC) • 46, 47, 92, 93
Impaktion • 25
Impaktor • 31
Industrialiseringen • 11
Industrianlæg, udledning fra • 18, 30, 39, 46, 48
Internationale søfartsorganisation (IMO) • 93
IPPC-direktivet • 87, 89

J

Jagtvej • 56, 57, 69
Jern • 59, 61

K

Kaskadeimpaktor • 32
Katalysator • 43, 44, 45
Kedler, udledning fra • 30, 38, 40, 41
Keldsnor • 56, 58, 59
Knallerter, udledning fra • 43, 44
Kobber • 61
Kondensater • 28
Kondensation • 22
Kondensationskim • 23
Kondensationspartikeltæller • 33
Konventionen om Grænseoverskridende Luftforurening (LRTAP) • 36, 84
Korttidseffekter • 74, 77
Kraft-varme-værker, udledning fra • 38
Kraftværker, udledning fra • 18, 30, 37, 38, 48
Kræft • 73, 75, 76
Kulbrinter • 36, 92, 93
Kullagre, udledning fra • 37
Kunstgødning • 46
Kviksølv • 30
Kvælstof • 48, 91
Kvælstofdioxid • 21
Kvælstofmonoxid • 21
Kvælstofoxider • 17, 20, 21, 36, 46, 47, 92, 93
København • 56, 58, 61, 69, 90
partikler • 65
udledning fra • 45, 94

L

Landbaggrundskoncentration • 54
Landbrug, udledning fra • 37, 39, 46, 48
Landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP) • 56
Langtidseffekter • 74, 79
Langtransporteret luftforurening • 54, 64
Lastbiler, udledning fra • 43, 44, 45
Lave kilder • 54
LCP-direktivet • 87
Lille Valby • 56, 58, 59, 62
Lindet • 59
LMP • 56
London, luftforurening • 11, 12
LRTAP • 36, 84
Luftforurening • 10
fotokemisk • 86
langtransporteret • 54, 64
lokalskala • 63, 64
Luftkvalitet • 56
modeller • 63
regulering af • 84, 86
Luftrammedirektivet • 86
Luftvejledningen • 89
Luftvejssygdomme • 73
Lungeblærer • Se alveoler
Lungekræft • 73, 74
Lungesygdomme • 74, 75, 78

M

MARPOL-konventionen • 93
Masseovne • 42
udledning fra • 41
Miljøzoner • 90, 91
Mobile kilder, udledning fra • 39
Motorcykler, udledning fra • 43, 44, 45

N

Nanopartikler • 27
Natriumnitrat • 21
Naturgasfyr, udledning fra • 38
Naturlige kilder • 10, 18, 30, 48
NEC-direktivet • 87, 92
Nukleation • 22

O

Odense • 56, 58
Oliefyr, udledning fra • 38, 62
Operational Street Pollution Model (OSPM) • 65
OSPM • 65, 67
Oxidativt stress • 75
Ozon • 21, 86

P

Particulate Matter (PM) • 26
Partikelfilter • 44, 45
Partikler
bevægelse • 23
dannelse af • 16, 46

eksponering for • 66, 68, 73, 78
grænseværdier • 58
helbredseffekter • 72, 74, 76, 78, 79, 80
historiske data • 11
i atmosfæren • 25
indendørs • 69
indholdsstoffer • 30, 60
kilder • 10, 17, 30, 36, 43, 48, 54
koncentrationer • 54, 58
luftforurening • 10
måling af • 28, 33
naturlige kilder • 18
nye trusler • 99
overvågning af • 56
primære • 17, 30, 37
regulering af • 87, 88, 91
sekundære • 17, 20, 21, 30
størrelser • 16, 26, 27, 33
udledning af • 36, 38, 47
Personbiler, udledning fra • 44, 45
Pillekedler, udledning fra • 41
PM_{10} • 26, 27, 30, 36, 47, 61
koncentrationer • 65
$PM_{2.5}$ • 26, 27, 30, 36, 61, 93
koncentrationer • 55, 62
regulering af • 94
udledning af • 40, 92
Polycykliske aromatiske hydrocarboner (PAH) • 22, 30, 40
Primære partikler • 17, 30
udledning af • 37, 47

R

Raffinaderier, udledning fra • 37
Reduktionspotentiale • 41
ROS • 75
Røggasser • 17

S

Salpetersyre • 21
Saltpartikler • 18, 54, 59, 60, 94
Sedimentation • 23, 24
Sekundære partikler • 17, 30
dannelse af • 20, 21
udledning af • 47, 64
Selektive katalytiske reaktorer • 91
Sepstrup Sande • 59
Silicium • 59
Skibstrafik, udledning fra • 30, 39, 46, 48, 93
Slagslunde • 62
Slagtilfælde • 74
Slidpartikler • 43, 46, 60, 94
Smog • 11, 12
Sodpartikler • 18, 27, 28, 30, 54
måling af • 33
Støvpartikler • 17, 19, 30, 37, 54, 60, 61
Sukkersyge • 79
Sulfat • 60
Svovl • 30
Svovldioxid • 17, 20, 21, 36, 46, 47, 49, 92, 93
Svovlsyre • 21

T

Tange • 59
Terpener • 10
Tjærestoffer • 18
Togtrafik, udledning fra • 39
Total Suspended Particulates (TSP) • 36, 91
Transport, udledning fra • 37, 39, 46
Tunge køretøjer, udledning fra • 43, 44
Tungmetaller • 22, 28, 30, 59, 61

U

UBM • 65
Udstødningsgasser • 17, 22, 43, 60, 94
Ulborg • 59
Ultrafine partikler • 16, 27
helbredseffekter • 74, 75, 76
UNECE • 36, 84
Urban Background Model (UBM) • 65

V

Vanddamp • 21
Vandmiljøhandlingsplaner • 90
Varebiler, udledning fra • 43, 44, 45
Vedvarende energi • 90
Vejtrafik, udledning fra • 27, 30, 39, 43, 44, 45, 48, 60, 61, 65, 88
Vindinge • 62
Vindmøller • 90
VOC-aftalen • 90
Volatile organic compounds • Se Flygtige organiske forbindelser

Z

Zink • 30

Å

Aalborg • 56, 58
Åreforkalkning • 75
Århus • 56, 58

Luftforurening med partikler – et sundhedsproblem
Redigeret af Finn Palmgren

Luftforurening med partikler udgør et miljøproblem, der på såvel nationalt som internationalt plan har modtaget stigende opmærksomhed. Baggrunden for denne opmærksomhed er primært en række undersøgelser, som har påvist en direkte sammenhæng mellem partikelforurening i luften og en øget sygelighed og dødelighed.

Denne bog beskriver, hvad partikler er, hvordan og hvor partikelforureningen dannes, og hvad man kan gøre for at begrænse den. Blandt andet kan man læse om:

- de forskellige typer af partikler
- dannelse af partikler
- kilder til partikelforurening
- sundhedseffekter
- grænseværdier
- reguleringsmuligheder

Bogen indeholder den nyeste viden og er skrevet for ikke eksperter uden at slække på den faglige kvalitet.

ISBN 978-87-7070-126-6

9 788770 701266

Danmarks Miljøundersøgelser
Aarhus Universitet