

Luftforurening

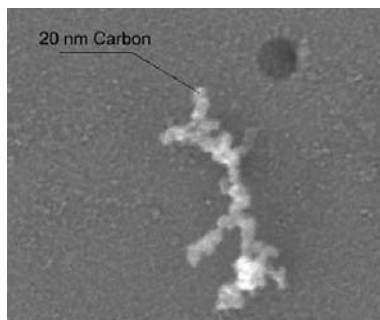
- miljø og helbred

Af geolog., Ph.D. Keld Alstrup Jensen, forsker, Arbejdsmiljøinstituttet

Afbrænding af fossile brændstoffer fører til luftforurening, som påvirker både miljø og helbred. Heriblandt forsuring, drivhuseffekt, astma, hjerte-kar-sygdomme og forhøjet dødelighed. Hvad består luftforurening egentligt af? Hvordan klassificerer man støv? Hvilke partikler påvirker vores helbred og hvordan? Dette er nogle af de spørgsmål, som besvares her.

Året er 1952, og vi er London. Det er december, og en kold tung luft hænger over Thamesdalen. En temperaturinversion medfører, at osen fra det kulfyrede London hobes op i de nederste luftlag. Den 5.-9. december bliver det så slemt, at folk begynder at hoste og få det dårligt. På den værste af disse dage, der senere bliver kendt som "The London Fog Episode", dør fem gange flere londonere end normalt; altså op til ca. 900 i døgnnet mod normalt ca. 260. Senere undersøgelser viste, at overdødeligheden skyldtes en forhøjet koncentration af SO₂ og mængden af røgpartikler (aerosoler) i luften.

London Fog episoden blev således en af de første i nyere tid, der på dramatisk vis dokumenterede farligheden af den menne-

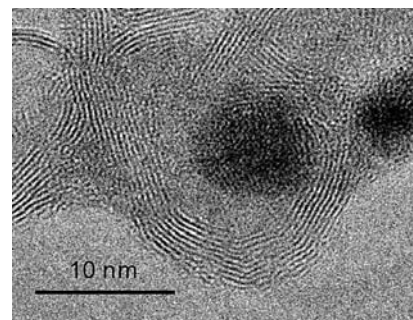


Scanningelektronmikroskopi-billede af en fraktalformet karbonpartikel fra biludstødning (Foto; L. Morowska; Queensland University of Technology, AU)

skeskabte luftforurening. Det første kendskab til luftforureningens effekt på vores helbred kan dog faktisk spores helt tilbage til det niende århundrede, hvor man i London begyndte at fyre med "sea-coal" fra Englands NØ kyst. Dette kul udvikler en del røg og lugtgener ved afbrænding og ledte mange år senere Kong Edward I af England (1272-1307) til at forbyde brugen af "sea-coal" i London pga. "den stank og skade på det menneskelige helbred, røgen forårsagede".

Emissionen fra Danmark

Siden 1950'erne og især de sidste ti år har man gjort meget for at begrænse luftforureningen fra afbrænding af fossile brændstoffer. I de vesteuropæiske lande er



Højopløseligt transmissionselektronmikroskopi-billede af sodpartikel med nanokrystal (sort) i midten. Linierne i partiklerne viser områder, hvor kulstoffet er krystallint. (Foto: S. Utsonamiya, University of Michigan, USA)

emissionen fra f.eks. kulværker reduceret med mere end 95%, så kun en lille del af de fineste partikler slipper ud. Desuden er der udviklet blyfri benzin, der er kommet katalysatorer på bilerne osv. Energiforbruget fra fossile brændstoffer og den intensiverede biltrafik i storbyerne påvirker dog stadig miljøet og befolkningens helbreds-situation. Emissionen af gasser er stadig ret signifikant, hvor CO₂ (og CO), CH₄ og N₂O, der kan medvirke til drivhuseffekt, tilsammen udgør ca. 98% af al emission fra Danmark. CO₂ alene udgør 97% (57.500.000 tons), hvoraf ca. 50% udledes fra kraft-varmeværker. Kraft-varmeværker udleder desuden ca. 66% (37.127 tons) af al den frigivne SO₂. Til sammenligning udledes 26,6% af den totale CO₂ udledning samt 67% (362.682 tons) af CO- og 10% af SO₂ udledningen fra trafikken. Desuden kommer 46,5% af VOC'erne (*Volatile Organic Compounds*) og 60,5% af NO_x'erne fra trafikken. Den danske emission af metaller, primært Zn (22,9 tons), Cu (9,6 tons), Pb (7,3 tons Pb), Se (3,5 tons) og Cr (2,7 tons), synes umiddelbart at være mere moderat, men flere af metalforbindelserne kan påvirke vores miljø og helbred ved selv lave koncentrationer. Da trafik og kraft-varmeværker er de største enkeltkilder til den danske emission, er der ingen tvivl om, at Kyotoaftalen og "Lille Kyoto" kommer til at spille en rolle i den teknologiske udvikling inden for energi og transport de kommende år.

Hvad siger epidemiologien

Interessant nok har der i forbindelse med Kyoto-aftalen ikke været så stor fokus på helbredseffekten af luftforureningen. Det er

Stof	Tons	Kraftværker/energi %	Forbrændingsanstalt %	Affaldsbehandling %	Olie-industri %	Landbrug %	Øvrig industri %	Transport Vej %	Øvrig %	Andre kilder %
SO ₂	55.914	66,4	5,9	0,1	0	0	17,7	2,3	7,6	0
NO _x	210.171	26,6	3,2	2,3	0	0	7,4	33	27,5	0
VOC*	142.141	1,2	5,6	0,9	3,9	0,8	31,2	32,4	14,1	9,9
CH ₄	623.076	2,8	1,5	8,9	2,2	27	0,2	0,5	0,1	56,9
CO	541.316	2,5	24,2	0,6	4,4	0	1,1	49,8	17,5	0
CO ₂	57.018.024	49,5	10,3	1,6	0	0	12	19,9	6,7	-0,0017
N ₂ O	31.066	3	0,6	0,1	0	63,5	0,5	4,6	3	24,8
NH ₃	95.986	0	0	0	0	97,9	-	2,1	0	0
Metaller	65									
PAH	11									
Total	58.717.770									

Tabel over danske emissioner i 1999. VOC: Volatile Organic Compounds; PAH: Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (Kilde; DMU; www.dmu.dk).

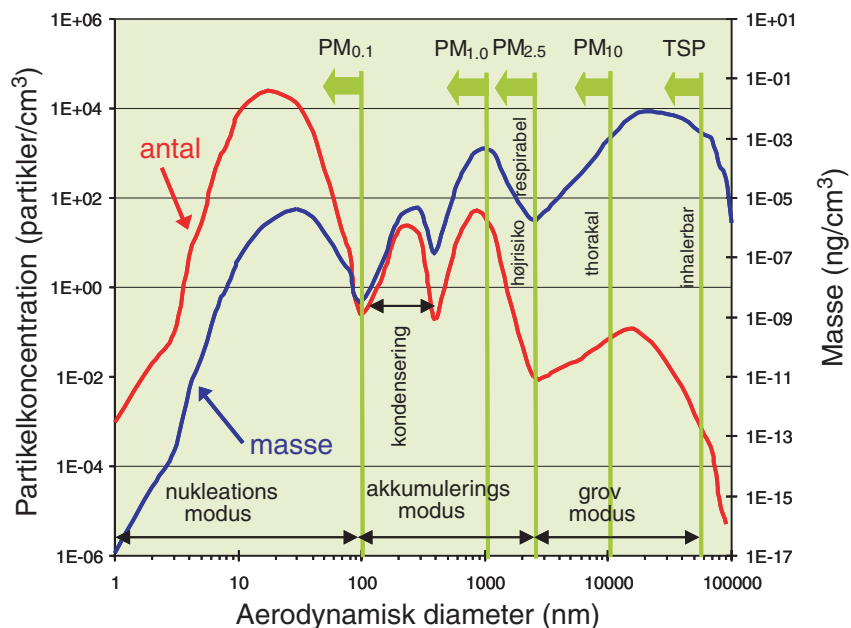
dog ikke ensbetydende med, at luftforureningen ikke betyder noget for helbredet. I det medicinske tidsskrift *The Lancet* (vol. 356, s. 795-801) fra 2000 viste Künzli et al., at der bare i Frankrig, Østrig og Schweiz dør ca. 40.000 mennesker for tidligt hvert år pga. luftforurening. Dertil kommer ca. 300.000 bronkitistilfælde og 500.000 astmaanfald. Tilfældene korrelerer stærkt med mængden af CO, CO₂, SO₂ og mængden af aerosoler i luften.

En ekstrapolering af Künzlis undersøgelse til danske forhold foretaget af Institut for Folkesundhedsvidenskab (KU) antyder, at op mod 400 dødsfald, 1900 bronkitistilfælde og godt 20.000 astmatilfælde måske kan tilskrives trafikforureningen i Storkøbenhavn pr. år. Disse tal kan man naturligvis ikke sidde overhørig. Derfor undersøges nu intenst, om disse estimater er realistiske samt hvilke doser, faktorer og processer, der har størst betydning for udviklingen af helbredseffekterne, samt hvorledes problemerne kan elimineres. Deriblandt er aerosolernes størrelsesfordeling, sammensætning og egenskaber under luppen, fordi indhaleringseffektiviteten og negative helbredseffekter stiger med faldende partikelstørrelse, og at visse kemiske stoffer er toksiske ved selv lave koncentrationer. Det hjælper imidlertid ikke at opholde sig mere inden døre, for undersøgelser viser, at 40-100% af de fine partikler fra udeluften typisk trænger ind i bygninger. Dertil kommer så partikler fra indeklimakilder (mennesker, dyr, madlavning, brændeovne, printere, maskiner osv.). Så man er altså slet ikke i sikkerhed, bare man går indendørs.

Aerosoler og deres klassificering

Aerosoler består af væske og faststofpartik-

Ideal Antal/Masse-fordeling for aerosoler plottet mod D_a for et trafikdomineret miljø



Luftforurening fra fossile brændstoffer: Miljø og helbred. (Grafik: Forfatteren)

ler, som varierer i størrelse fra ~ 2 nm til ~ 100 µm. I det naturlige udendørsmiljø består aerosolerne primært af jord- og bjergartsfragmenter, pollen, saltforbindelser fra havet, organiske fragmenter (især fra planter og insekter), samt en række partikler dannet ved gas-gas-reaktioner og gas-væskefasetransformationer. Dertil kommer den menneskeskabte luftforurening, som kommer fra afbrænding af fossile brændstoffer, minedrift, malmbearbejdning, industriel produktion, brug af slibemidler, samt slid på vejanlæg og bygninger mv.

Aerosoler klassificeres som funktion af

deres aerodynamiske diameter (D_a), defineret som diameteren for en sfærisk partikel med en densitet på 1 g/cm³. Plotter man antallet af aerosolpartikler mod deres D_a, ses typisk tre størrelsesintervaller (modus): transient nukleationsmodus (2 til ca. 80 nm), akkumuleringsmodus (100 nm til ca. 2,5 µm) og grov modus (større end ca. 2,5 µm). I den rene atmosfære dannes partikler i den transiente nukleationsmodus ved gas-fase-reaktioner, kondensation af gasser og vækst af nukleationspartikler. Akkumulationsmodus dannes hovedsageligt ved sammenklumpning af transient nukleationsmodus-partikler, men kondensation af gasser kan også medføre en specifik top i dette område. Plotter man derimod partiklernes massefordeling som funktion af D_a, hvilket tidligere var den normale praksis, ses der normalt kun en såkaldt fin (0,1 - 2,5 µm) og en grov fraktion (2,5 til ca. 100 µm). Det skyldes, at massen af de ultrafine partikler (< 0,1 µm) er meget lille og kun ses ved logaritmisk afbildning. Grunden til, at man hidtil har fokuseret på partiklernes massefordeling, er primært, at helbredseffekterne og grænseværdier normalt er formuleret som funktion af masse.

Derfor har de nationale overvågningsprogrammer i flere årtier foregået ved måling af det totale støv (TSP = *total suspended particles*), hvor skæringspunktet ligger ved 25 - 40 µm afhængigt af vindforhold omkring luftindsugningen og PM₁₀ (*Particulate Matter ≤ 10 µm*). PM₁₀ angiver koncentrationen af det såkaldte inhalable eller thorakale støv; dvs. det støv der kan passere næsen. I visse tilfælde måles også PM_{2,5} (*Particulate Matter ≤ 2,5 µm*), som angiver koncentrationen af det "respirable høj-risiko-støv", der kan trænge ned i den

	PM _{2,5}	PM ₁₀
Dannet fra	Gasser	Faste partikler eller dråber
Dannet ved	Kemiske reaktioner - nukleation - kondensering - koagulering - gas-gas-reaktioner	Mekanisk disintegration Fordampning af marine vanddråber Støvophvirvling
Sammensætning	Sulfat (SO ₄ ²⁻) Nitrat (NH ₃) Ammonium (NH ₄ ⁺) Hydroxonium (H ⁺) Elementar karbon Organiske karbonforbindelser (f.eks. PAH) Metaller (Pb, Cd, Ni, Cu, Zn, Mn, Fe)	Resuspenderet støv (jord, vejstøv) Kul og flyveaske Oxider (f.eks. Si, Al, Ti, Fe) CaCO ₃ NaCl Pollen, skimmelsvampe, svampesporer Plante- og dyrefragmenter
Kilder	Forbrænding af fossile brændstoffer Skovbrande Atmosfæriske omdannelsesprodukter af f.eks. NO _x , SO ₂ og organiske stoffer Højtemperaturprocesser: Smelteværker, stålværker og lignende	Resuspension af industrielt støv Resuspension af vejstøv Suspension af landbrugsjord Minedrift Biologiske kilder Byggeri & anlæg og nedrivning Kul og olieafbrænding
Atmosfærisk levetid	Dage til uger	Minutter til timer
Transportlængde	10 ² - x·10 ³ km	1 - x·10 ¹ km

Generelle data for aerosoler i fin (PM_{2,5}) og grovfraktionen (PM₁₀) baseret på Wilson & Spengler (1996). *Particles in Our Air: Concentrations and Health Effects: Harvard University Press.*

bronkio-alveolære region i børn og ånde-
drætsbesværede mennesker. Til sammen-
ligning ligger grænsen for det respirable
støv hos almindelige raske voksne menne-
sker ved ca. 4,7 µm (PM_{4,7}). Grundet ret
klare indikationer på, at partiklers skade-
lige helbredseffekt stiger ved faldende D_a,
samt at afbrænding af fossile brændstoffer
primært danner mange fine (< 1 µm) og
ultrafine partikler (< 0,1 µm), indføres nu
nye standardmåling til analyse af luftfor-
urening. Deriblandt PM_{2,5} (EU) og PM₁
(USA) samt evt. måling af partikelantal.

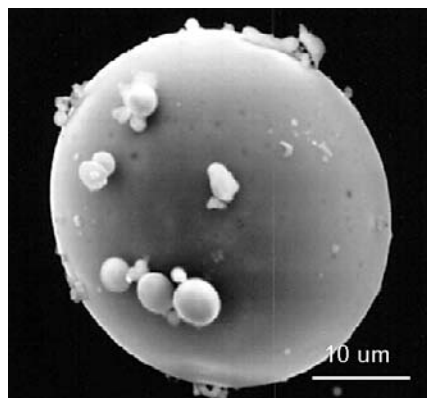
Forurening fra fossile energikilder

Afbrænding af fossile brændstoffer medfører
dannelse af en række gasser og partik-
ler. Gasserne inkluderer CO, CO₂, NO_x, SO₂
og organiske stoffer. De partikulære aerosoler
består primært af kulstofrige partikler (sod)
samt sulfater, nitratforbindelser og spor-
metaller alt afhængigt af brændstoffypen.

Benzin og diesel

Ved almindelig kørsel vil en benzinbil ud-
sende mindre end 1,2 mg udstødning pr.
km, hvorimod udstødningen fra en let
dieselbil typisk er 35 – 65 mg/km. Diesel-
biler udsender altså langt flere partikler end
benzinbilerne. Fra dieselbiler består ~96%
af den partikulære udstødning af sodpartik-
ler. Resten består af sulfater og nitratfor-
bindelser (~3 vægt%) samt sporstoffer af
forskellige metaller (~1 vægt%). Sodpartik-
lerne fra både benzin og dieselbiler består
af individuelle korn med en typisk diameter
på 20-30 nm og partikelaggregater (100 nm
til ca. 1 µm) med forskellige grader af frak-
talgeometri. Detaljerede undersøgelser vi-
ser, at sodpartiklerne langtfra er kemisk
homogene partikler. De består af nanokrys-
talline områder associeret med amorfe (or-
ganiske) kulforbindelser samt nanopartikler
af metalforbindelser. De amorfe områder
består primært af PAH'er, såsom de kræft-
fremkaldende benzo(k)flouranthene, ben-
zo(a)pyrene og benzo(e)pyrene.

Metalforbindelserne i den partikulære
emission fra benzin og dieselbiler kommer
fra sporstoffer i brændstoffet, motorfrag-
menter og katalysatorstøv. Sporstofferne
består hovedsageligt af Sr, Zn, Cd, V, Ni,



Al-silikat i flyveaske. (Foto: Microbeam Tech-
nologies Inc., North Dakota, USA)

Stof	Emission (kg)	Grænseværdi	Effekt
As	846	0,01 mg/m ³	Kræft, lungefunktion
Cd	713	*0,002 mg/m ³	Kræft, nyre, svejsefeber
Cr	2.650	^o 0,01 mg/m ³	Irritation, kræft
Cu	9.609	1 mg/m ³	Irritation
Hg	1.976	0,025 mg/m ³	CNS, nyre, neuropathy, syn, reproduktion
Ni	152	1,5 mg/m ³	Pneumoconiosis, lungekræft, nyre
Pb	7.337	0,05 mg/m ³	CNS, blod, nyre, reproduktion
Se	3.514	0,2 mg/m ³	Irritation
Zn	22.887	^s 10 mg/m ³	Lungefunktion
Andre			
V ₂ O ₅		0,05 mg/m ³	Astma, irritation, sensibilisering
Pt-salte		0,002 mg/m ³	Astma, irritation, sensibilisering
U (naturlig)		0,2 mg/m ³	Nyre, blod, kræft
Anthracit		0,4 mg/m ³	Fibrosis, pneumoconiosis, lungefunktion
Asbest		1000 fibre/m ³	Asbetosis, kræft
Grafit		2 mg/m ³	Pneumoconiosis
Kvarts		0,1 mg/m ³	Fibrose, silikose
Tridymit		0,05 mg/m ³	Fibrose, silikose
Dielselstøv		^s 0,15 mg/m ³	Astma, bronkitis, HKS, DNA-skade, kræft
Inert støv		[#] 3 mg/m ³	Lungefunktion, fibrose, pneumoconiosis

Data over emissionen af udvalgte tungmetaller (www.dmu.dk.) og tilladte 8 timers
grænseværdier for udvalgte stoffer baseret på American Conference of
Governmental Industrial Hygienists (1998). *Cr⁶⁺ forbindelser; ^oCd-forbindelser; [#]<
4 µm; ^sZrO₂; ^s< 1 µm; HKS = hjerte-kar sygdomme; CNS = centralnervesystemet.

Cu, Pb, Br, Cu, og Mo. Selvom sporele-
menterne normalt udgør mindre end 1
vægt% af trafikforureningen, spores disse
stoffer nemt i et trafikdomineret miljø som
f.eks. ved Jagtvej i København.

Katalysatorstøv består af Ce, Zr, La, Ba,
Rh, Pd samt Pt. En undersøgelse af fire
trafikdominerede områder af Göteborg
(30.000 - 70.000 biler/dag) viste, at kon-
centrationen af Pt var op mod 19,2 pg/m³,
hvilket antyder, at katalysatorstøvet for-
mentligt udgør mindre end 0,5 % af den
trafikrelaterede luftforurening. Dette er
dog nok til, at man i nysne i Centralgrøn-
land finder Pt, Pd og Rh i stort set det sam-
me forhold som i katalysatorer og med 40
(Pt), 80 (Pd) og 120 (Rh) gange højere
koncentration end i 7000 år gammelt ind-
landsis; dvs. ca. 0,6 pg Pt, 1,0 pg Pd og 0,1
pg Rh pr. g sne. Dette vidner om den glo-
bale kontaminering med luftforureningen
og fører til spekulation om bioakkumu-
lering af uønskede stoffer i fødekæden.



Fe-partikel i flyveaske. (Foto: Microbeam Tech-
nologies Inc., North Dakota, USA)

Olie og kul

Olie og kul danner flyveaske ved afbræn-
ding. I begge tilfælde består flyveasken
primært af kulforbindelser, men flyveasken
fra afbrændt olie indeholder en langt min-
dre mængde metaller end den fra kulaf-
brænding. Sammensætningen varierer dog
en del, alt efter hvor kullet stammer fra.
Hovedelementerne fra kulafbrænding er
typisk C, Si, Al, Na, Ca og Mg. Her vises
et par eksempler på fordelingen af udvalgte
elementer i PM_{2,5} flyveaske fra kul og olie.
Det ses, at S og overgangsmetallerne udgør
en relativt stor andel af PM_{2,5} fra kul, men
ikke så meget som i PM₁ på Jagtvej i Kø-
benhavn. Flyveasken fra den viste olietype
består til sammenligning primært af V, Fe,
Ni, Cu og Zn. Indholdet af Pb er også rela-
tivt højt i oliens flyveaske og ligger pro-
centvis på linie med den i luften på Jagtvej.

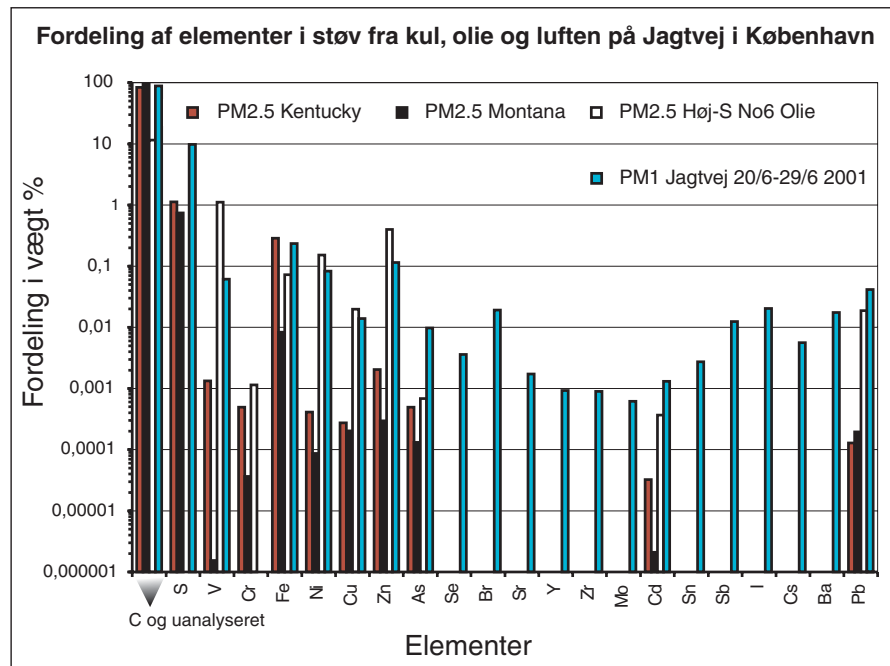
Aerosolernes sammensætning og form
fra især kulafbrænding afhænger meget af,
hvor effektivt forbrændingen sker, og hvor
rent kullet er. Dette er bl.a. demonstreret i
en undersøgelse af luftforureningen i Sos-
nowiec i regionen Silesia (det sydlige Pol-
en); et af de områder i Europa der er vær-
ramt af luftforurening fra stålindustri og
kulbaseret energi. En stor del af soden i
dette område bestod af mineralinklusioner
eller delvist opsmeltede mineraler fra kul-
brændslet. Heriblandt 0,1 til godt 5 µm
store Al-holdige Si-partikler. Den dårlige
afbrænding af kullet resulterede desuden i
en del pladeformige (0,3 til 34 µm) karbon-
partikler, hvor der ved en effektiv afbræn-
ding primært dannes sfæriske karbon-
partikler. I Sosnowiec var de pladeformige
karbonpartikler letopløselige og indeholdt
ofte nm-store inklusioner af SiO₂-Al₂O₃

partikler og baryt (BaSO_4). Den høje opløselighed af de pladeformige karbonpartikler kan medføre en hurtig afgivelse af organiske forbindelser, hvilket måske gør dem mere problematiske i miljø- og helbredsmæssige sammenhænge. Baryt derimod er tungtopløselig og kan derfor have lange residenstider i lungen.

Helbredseffekter og mekanismer

Inhalering af aerosoler kan lede til en akut irritation af luftvejene, astma, bronkitis og mere alvorlige sygdomme ved eksponering over lang tid. Fra mineralsk støv ved man, at faktorer såsom morfologi (fibrøsitet), overfladetopografi, elektrisk ladning og kemiske egenskaber (bulk kemi, overflade kemi, redox-egenskaber og opløselighed) spiller en stor rolle. Det er nu almindelig anerkendt, at disse egenskaber også gælder for helbredseffekten af partikler fra den menneskeskabte luftforurening. Simplificeret kan man sige, at en lav opløselighed kan medføre støvophobning i lungen med efterfølgende lungeirritation og evt. dannelse af arvæv, som kan resultere i sygdommen fibrosis. Fibrosis er mistænkt for at gøre folk mere sårbare over for hjertekar-sygdomme. Elektron-donor-elementer som f.eks. jern ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 1e^-$) kan derimod resultere i dannelse af f.eks. oxygenradikaler ($\text{O}_2 + 1e^- \rightarrow \text{O}_2^-$) og følgende oxidativ stress af lungeceller.

Kemotoksiske og carcinogene elementer såsom Be, Cd, Hg, Pb og organiske forbindelser såsom PAH'erne er, som ordet beskriver, giftige for vores organisme. Alt efter deres koncentrationsniveau kan de forårsage irritation i luftvejene og andre – mere alvorlige sygdomme, inklusiv hjerteanfald og kræft. I tabellerne oven- og ne-



Fordelingen af udvalgte stoffer i den trafikdominerede PM_{10} -partikulære luftforurening ved Jagtvej i København, samt $\text{PM}_{2.5}$ i flyveaske fra forbrænding af kul fra Kentucky og Montana og olie (Høj S type nr. 6). (Data fra Linak et al., 2000, *J. Air & Waste Management*, vol 50, p. 1532-1544. Data for PM_{10} på Jagtvej i København stammer fra A. Sharma; specialestudent ved Arbejdsmiljøinstituttet. (Grafik: Forfatteren og BES).

denfor opsummeres grænseværdierne for udvalgte stoffer i arbejdsmiljøet og nogle af de processer, der er mistænkt for at resultere i de respektive sygdomme. Det skal dog her pointeres, at der er lang vej endnu, før vi kan sætte et endeligt lighedstegn mellem de forskellige processer og observerede negative helbredseffekter.

Hvad sker der så?

Ja, der sker faktisk en masse på både den nationale og internationale scene. Der un-

dersøges, hvor meget vi egentlig forurener luften; hvordan luftforureningen spiller ind på skydannelse, skyernes kemi, og hvordan den ændrer geokemien; hvordan og hvor meget den påvirker det menneskelige helbred; og ikke mindst hvordan forureningen kan mindskes. I Danmark følger Danmarks Miljøundersøgelse (DMU) den daglige udledning ved målestationer i København, Odense og Århus (www.dmu.dk). Desuden støtter staten et par store tværfaglige undersøgelser i bl.a. Centret for Miljø og Luftveje (www.ami.dk/research/cml/index.htm) og det såkaldte TRIP-projekt (Centre for Transport Research on environmental and health Impacts and Policy; (www.akf.dk/trip/index.htm)). I TRIP forsøges der i et samarbejde mellem bl.a. DMU, Arbejdsmiljøinstituttet, Risø og By&Byg at få et mere detaljeret overblik over befolkningens eksponering med fokus på, hvor meget af luftforureningen der trænger ind i bygninger tæt op ad trafikerede gader. Når man ser på masse- og størrelsesfordelingen af partikler alene, antyder midlertidige resultater fra både TRIP-projektet og tilsvarende udenlandske undersøgelser, at store dele af PM_{10} trænger ind i mekanisk ventilerede huse.

På energiproducenternes side går det også stærkt. *Solid-Oxide-Fuel-Cell* (SOFC), som kan udnytte mere end 80% af den kemiske energi i gas mod konventionelle metoders godt 50%, testes i storskala inden for de næste par år. Vindenergi kommer nok til at dække 10% af Danmarks energibehov i 2010. Nye bilmotorer med 10% af nutidige $\text{PM}_{2.5}$ emissioner er under udvikling, og hybridbiler er på vej ind i gadebilledet. Fremtidens luft bliver nok væsentlig bedre, end den vi oplever i dag!

Foreslået kemisk mekanisme	Foreslået biologisk mekanisme	Mulige følgesygdomme
Lav opløselighed (f.eks. BaSO_4)	Ophobning og uafsluttet opløsning i lungernes skraldespandceller (makrofager). Ultrafine partikler kan trænge ind i lungevævet og evt. også blodbanerne.	Luftvejsirritation, astma, bronkitis, fibrosis, kræft, hjertekar-sygdomme
Høj opløselighed (f.eks. $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)	Frigivelse af toksiske elementer/species	Afhænger af toksicitet. $\text{BeSO}_4 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$ medfører kræft og død ved meget lave doser
Høj elektrisk ladning	Føret deponeringsevne i lungen og dermed føret akkumuleringssevne	Afhænger af opløselighed og toksicitet
Brønsted syrereaktion - protonoverførsel fra ubalancerede oxygenbindinger ifm. kationsubstitution eller brudte bindinger ved overfladen	Oxidativ stress via katalytisk produktion af oxygen-radikaler ved partiklernes overflade	Luftvejsirritation, DNA-skade, celledmutation og kræft
Lewis syre/base-reaktioner - elektron-donor/acceptor-reaktioner med polyvalente kationer	Oxidativ stress via katalytisk produktion af oxygen-radikaler ved partiklernes overflade	Luftvejsirritation, DNA-skade, celledmutation og kræft
Frigivelse af løstbundne kationer (f.eks. Be, Cd, As, Se, Hg, Pb)	Irritation af celler efter optagelse af toksiske elementer/species eller transport af toksiske elementer ind i blodbane	Celleforgiftning eller forgiftning af centralnervesystemet, forgiftning af person
Specifik overfladeperiodicitet der kan medføre reaktion med et DNA-molekyle (f.eks. PAH)	Blokering af nukleotider på DNA-streng under DNA-multiplikation og celledeling	DNA-skade, celledmutation og kræft
Dannelse af syre under over opløsning (f.eks. SO_4^{2-} fra sulfater)	Irritation af celler	Astma

Oversigt over den mulige sammenhæng mellem kemiske og biologiske processer ved inhalering af partikler med specifikke egenskaber koblet med mulige helbredseffekter.