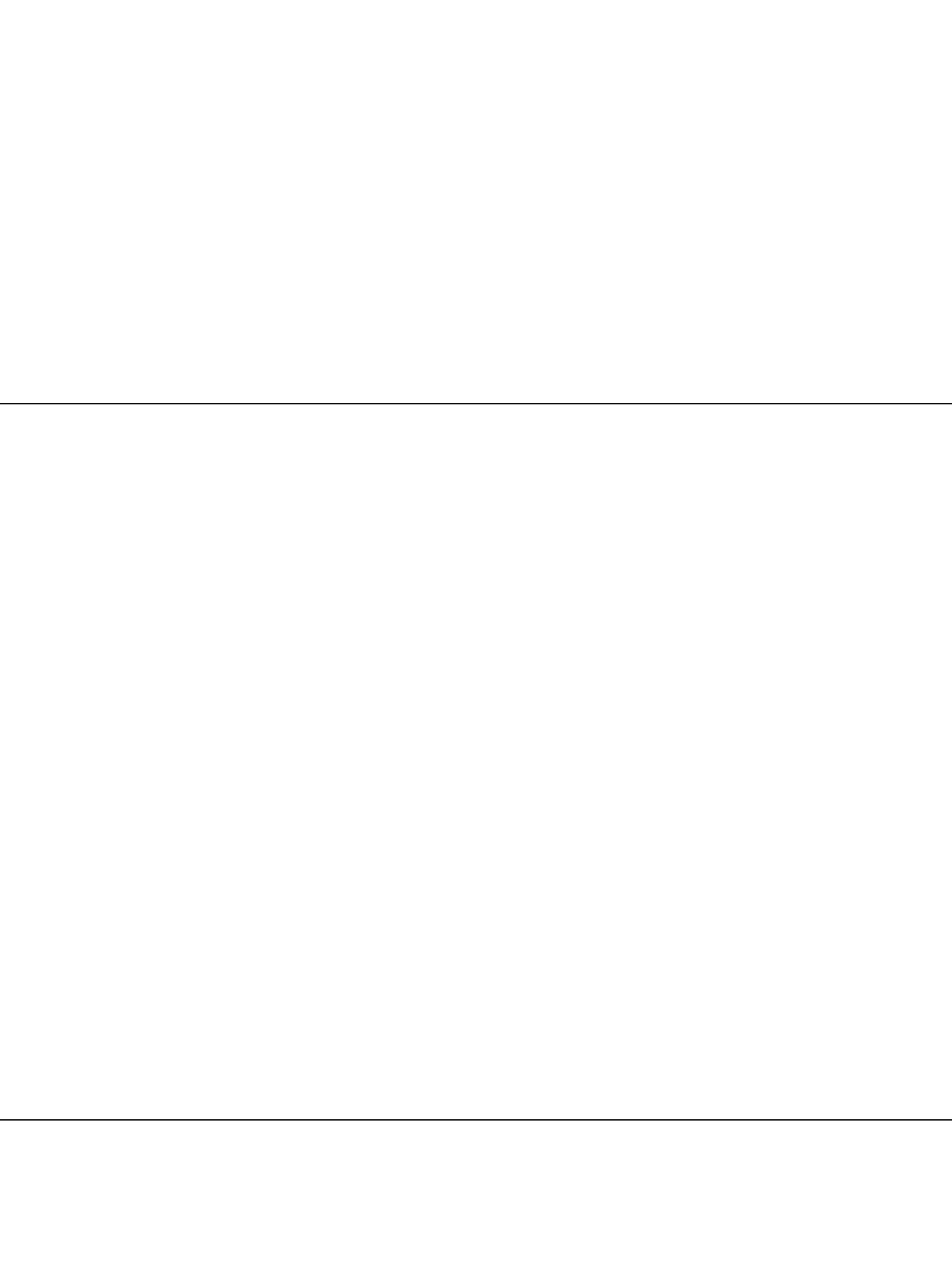


Luft- forureningens historie



Jes Fenger er uddannet som civilingeniør i elektrofysik. Dr. phil. i radiokemi. Har siden slutningen af 1970'erne arbejdet med virkninger af luftforurening – specielt forøgelsen af drivhus-effekten. Ansat ved Danmarks Miljøundersøgelser, Afdelingen for Atmosfærisk Miljø i Roskilde.





Luftforureningens historie

– fra et indendørs til et globalt problem

Jes Fenger



Luftforureningens historie

- fra et indendørs til et globalt problem

Af Jes Fenger

© 2004 Danmarks Miljøundersøgelser, Jes Fenger 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 12. marts 2003 med evt. senere ændringer. Det er tilladt at citere med kildeangivelse i anmeldelser.

Forlagsredaktion: Ole Jørgensen

Illustrationer og ombrydning: Britta Munter,

Grafisk Værksted, Danmarks Miljøundersøgelser

Omslag: Grafisk værksted, Danmarks Miljøundersøgelser

Omslagsfotos: Wilhelm Tillge, ca. 1865

Tryk: Narayana Press, Gylling

Denne bog er trykt på 130 g Cyclus Print

Overskydende papir er genbrugt

ISBN 87-7739-740-1

2. udgave, 1. oplag 2004

Forlaget Hovedland

www.hovedland.dk

E-mail: mail@hovedland.dk

Forord 6

1



Forureningen og den globale vækst 9

2



Atmosfærens opbygning 17

3



Byen 25

4



Forurening uden grænser 41

5



Hullet i himlen 65

6



Varmedøden 75

7



Det hele hænger sammen 93

Litteratur til videre læsning 98

Stikordsregister 101

Holdningen til luftforurening har ændret sig gennem tiden. Helt op til 2. verdenskrig blev det til en vis grad betragtet som et positivt tegn på vækst. Reklameplakat af Ib Andersen for den britiske udstilling i 1932.



Forord

Denne bog fortæller historien om luftforureningen og forsøgene på at bekæmpe den. Og den antyder samtidig koblingen mellem de enkelte fænomener. Bogen indledes derfor med en kort generel beskrivelse af atmosfærens opbygning og forureningens spredning. Derefter fortællers, hvordan luftforureningen er vokset både i tidsmæssig og geofysisk målestok: fra byforurening over grænseoverskridende forurening til globale fænomener som nedbrydningen af ozonlaget og den forøgede drivhuseffekt.

Generelt er bogen skrevet uden direkte litteraturhenvisninger, men i enkelte tilfælde, hvor der er benyttet publiceret materiale, er dette angivet i teksten. Flere af de anvendte figurer er brugt af mange forfattere i forskellige sammenhænge; hvor der er angivet en kilde, er denne den benyttede og dermed ikke nødvendigvis den primære. Litteraturlisten bag i bogen er ikke en egentlig referenceliste, men giver forslag til videre læsning.

En tidligere udgave har været udsendt som TEMA-rapport fra DMU (11/1997). Denne nye udgave er i særdeleshed opdateret med hensyn til problemerne ved den forhøjede drivhuseffekt. Forfatteren takker alle, der – tidligere og nu – har bidraget med materiale og kommentarer.



Fotos: Highlight.



Forureningen og den globale vækst



Menneskene har påvirket atmosfæren lige siden de begyndte at udnytte ilden. Omfanget og konsekvenserne af denne påvirkning er efterhånden vokset til globale dimensioner, og vi er nu i gang med en udvikling med så megen inert, at den ikke umiddelbart kan stoppes.

Foto: FotoDisc.

I de gode gamle dage

I 1866 er H. C. Andersen i Paris og skriver i sin dagbog den 13. april om, hvordan han sidder og kigger på »nogle vistnok døde Træer, de havde som jeg ikke kunnet tåle Pariserluftten, og da de ikke kom af sted, vare de gået ud«. Samme år udkommer Ibsens poetiske drama »Brand«, hvor titelpersonen i sidste akt udbryder:

*Værre tider; værre syner
gennem fremtidsnatten lyner!
Brittens koalme stenkulssky
sænker sort sig over landet,
smudser alt det friske grønne,
stryger lavt med giftstof blandet,
stjæler sol og dag fra engen,
drysser ned som askeregnen
over oldtids dømte by.*

Figur 1-1
Bilreklame i Jugendstil
af Gerda Wegener.



Fem år tidligere (i 1861) havde den engelske forsker Tyndall påvist, at ændringer i atmosfærens indhold af kuldioxid kan være årsag til klimaændringer. Men mange af de forureningsproblemer, vi slås med i dag, har været kendt endnu længere tilbage. Litteraturen vrimler med beskrivelser af den dårlige luft i byerne; fx skrev Seneca i år 61 om røgen og madosen i det klassiske Rom. Og måske er den sjette ægyptiske plage, der beskrives i Anden Mosebog fra omkring år 1000 før Kristus et af de første eksempler på industriel forurening:

Derpå sagde Herren til Moses og Aron: »Tag begge eders hænder fulde af sod fra smelteovnen, og Moses skal kaste det i vejret i Faraos påsyn! Så skal det blive til en støvsky over hele Ægypten og til betændelse, der bryder ud i bylder på mennesker og kvæg i hele Ægypten!«

Selv om problemerne altså ikke blev ignoreret, var holdningen til dem ambivalent. Det var ikke langt fra, at forurening blev betragtet som et symbol på aktivitet og vækst – ord som dengang havde en mere ubetinget positiv klang end nu. Prøv bare at se på reklamer fra før 2. Verdenskrig: Rygende skorstene og biler, der suser forbi i en støvsky. Næppe et image nogen kunne finde på at dyrke i dag.

Alligevel er det overraskende, at den danske »Opfindelsesnes bog« – i en firebindsudgave fra 1912-14 – overhovedet ikke nævner luftforurening. Og man kommer ellers langt omkring med fremtidens energikilder inklusive (tro det eller lad være!) radium og det, der kaldes »indre atomenergi«. Heller ikke Salmonsens Leksikon nævner forurening – end ikke i supplementsbindet, der udkommer i 1930. Miljø (stavet »milieu« og ikke med den betydning det har fået i dag) får kun små fire linjer, mens til sammenligning »militærmusik« får halvanden spalte.

Ifølge »Nye ord i dansk 1955-75« optræder ordet »forurening« faktisk først som begreb på dansk i slutningen af 1960'erne, hvorefter det i løbet af få år bliver udbredt til at omfatte stort set enhver form for forurening: knallertforurening, visuel forurening – og selvfølgelig også luftforurening. Og så viser det sig alligevel, at Emma Gad (hende med »Takt og Tone«) allerede i 1903 i »Vort Hjem« skrev »at holde luften

i vor bolig frisk og fri for forureninger er en meget vigtig opgave«. Hun skrev også »at det elektriske lys ikke forurener luften«, hvilket jo desværre ikke er helt rigtigt.

For mange er luftforurening et moderne fænomen knyttet til de seneste par hundrede års industrialisering. Det er, som det fremgår, en sandhed med modifikationer. Menneskene har påvirket atmosfæren lige siden de begyndte at udnytte ilden, men omfanget og konsekvenserne af denne påvirkning er efterhånden vokset til globale dimensioner. Og vi er nu i gang med en udvikling med så meget inert, at den ikke umiddelbart kan stoppes.

I den politiske og offentlige debat behandles problemer med luftforurening ofte ét ad gangen. Men de basale processer finder alle sted i den samme atmosfære, og problemerne er derfor alle mere eller mindre koblet sammen. De er også koblet til miljøproblemer af andre typer: vandforurening, jordforurening osv. Endelig er virkningerne af miljøændringer normalt et resultat af en kompleks påvirkning.

Figur 1-2
Politikens jubilæumsnummer
den 1. oktober 1934.
H. C. Ørsted Værket tegnet
af Sikker Hansen – før det
blev moderne med røggas-
rensning.



Forureningsudslip

Hovedårsagen til moderne luftforurening er anvendelsen af fossile brændsler, dvs. kul, olieprodukter og gas. Umiddelbart kan den såkaldt primære luftforurening her opstå på forskellig vis:

- Som et slutprodukt ved forbrændingen. Her er det dannelsen af først og fremmest kuldioxid, der frigør energien.
- På grund af urenheder eller additiver i brændslet; typiske eksempler er svovl i olie eller bly i benzin.
- Under selve forbrændingen, som kan være ufuldstændig eller føre til dannelse af nye forbindelser; typiske eksempler er kulilte, kvælstofoxider og kulbrinter.

En anden vigtig årsag er industrielle aktiviteter, hvorfra der normalt kommer stoffer af samme type, men i andre relative mængder – fx relativt mere kulbrinter. Og fra landbrugsaktiviteter kommer bl.a. ammoniak, metan og lattergas.

Efter udslippet kan de primære forureninger reagere i atmosfæren, hvorved der opstår sekundære forureninger; mest betydning har den fotokemiske luftforurening, der dannes, når kulbrinter og kvælstofoxider reagerer under indvirkning af sollys.

Væksten i det globale udslip

Groft taget og populært sagt bestemmes de samlede forureningsudslip af tre faktorer: Antallet af mennesker, deres materielle levestandard og den anvendte teknologi. Et givet sted er der imidlertid ikke nødvendigvis nogen simpel sammenhæng mellem forureningsudslippet og det resulterende forureningsniveau; det afhænger helt af mulighederne for spredning. Der er i princippet ikke noget galt i at nedsætte det lokale forureningsniveau ved at sprede forureningen, hvis de naturlige rensningsmekanismer (se nærmere side 20) kan følge med. Problemet er blot, at den globale vækst efterhånden har medført udslip med en størrelse, der overbelaster disse mekanismer helt op på globalt plan.

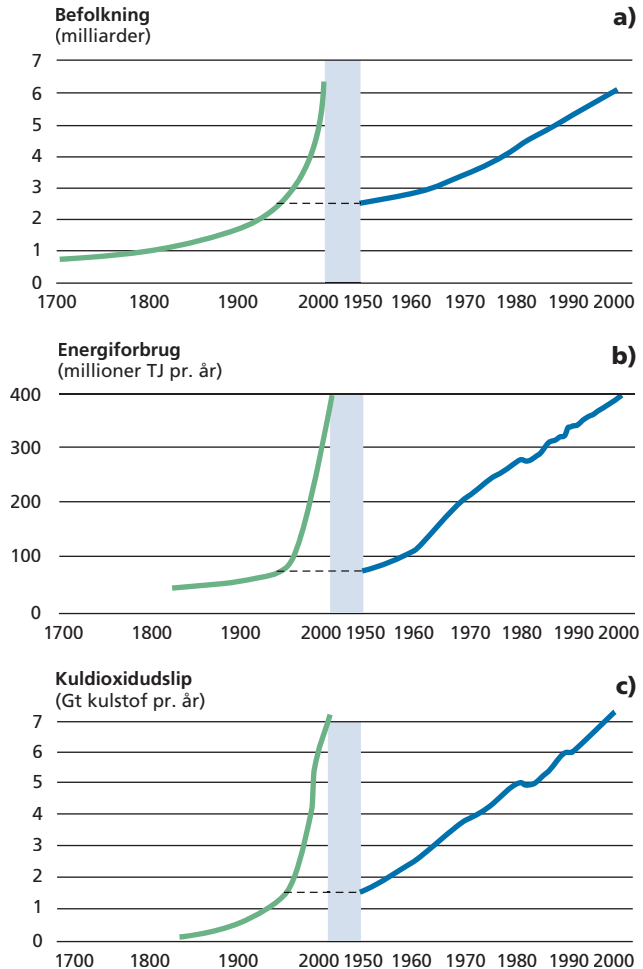
Verdens befolkning (figur 1-3a) var indtil for nogle hundrede år siden under en halv milliard. Omkring år 1900 var den under 2 milliarder, men nu er den omkring 6. Inden udgangen af dette århundrede vil vi efter al sandsynlighed være omkring 10 milliarder, før vi kan begynde at håbe på en stabilisering.

Siden 2. Verdenskrig er det globale energiforbrug steget endnu hurtigere (figur 1-3b). Da størstedelen af denne energi er

blevet fremstillet ved afbrænding af fossile brændsler og mindre mængder biobrændsler uden røgrænsning, har det betydet, at udslippet af luftforurening, globalt set, er steget tilsvarende. For Danmark har udviklingen stort set fulgt samme mønster, indtil der omkring 1970 skete en udfladning.

Verdens industriproduktion er steget med en faktor 10 siden afslutningen af 2. Verdenskrig. Det globale udslip af kuldioxid (figur 1-3c) er derimod steget stort set som anvendelsen af fossile brændsler. Det har, sammen med mindre bidrag fra bl.a. skovrydninger, medført at atmosfærens indhold af kuldioxid nu er godt 30 % højere, end det var før begyndelsen af industrialiseringen.

Figur 1-3
De lysegrønne kurver viser det udjævnede forløb af henholdsvis verdensbefolkningens størrelse (a), det globale energiforbrug (b) og det globale udslip af kuldioxid (c). Kuldioxidudslippet er opgjort som udslippet af kulstof alene. De blå kurver til højre viser de samme forhold med lidt flere detaljer for tiden efter 1950.



Ser man nøjere på de tal, som ligger bag de udjævnede kurver over verdensbefolkning, globalt energiforbrug og udslip af kuldioxid (figur 1-3), kan man lige ane en dæmpende virkning af de to verdenskrige, energikrisen, en hungersnød i Kina med 100 millioner døde og sammenbruddet i østlandene. Men globalt set er væksten fortsat uafbrudt.

Fremtidens forurening

En vurdering af den fremtidige luftforurening og dens virkninger må baseres på antagelser om udviklingen i befolkningstal, økonomi og teknologi. Ofte opstiller man såkaldte scenarier, der ikke må opfattes som prognoser, men kun som det, der ligger i ordet: Mulige fremtidige situationer. Man kan derfor også opstille flere forskellige scenarier, selv om – ifølge sagens natur – højst ét af dem vil blive realiseret.

I forbindelse med vurderinger af fremtidige klimaændringer rækker scenarierne typisk 100 år frem i tiden. Og det er, når det gælder teknologisk udvikling, meget lang tid. I sine erindringer fra »Det glade København« fortæller journalisten og forfatteren Carl Muusman om et foredrag i Industriforeningen omkring år 1900. Taleren ventede ingen større teknologiske landvindinger, for – som det hed:

»det nye Århundrede vil i det store og hele på det tekniske Område udnytte, forbedre og fuldkommengøre det gamle Århundredes Opfindelser, samtidigt med at det vil sætte hele sin overskydende Kraft ind på det sociale og kulturelle Udviklingsarbejde i Freneds og Fremskridtets Tjeneste«.

Talen blev efter sigende hilst med stærkt bifald, men hvem turde sige noget lignende nu?



Atmosfærens opbygning



Jordens diameter er næsten 13.000 km, men fra bunden af det dybeste ocean til toppen af det højeste bjerg er der kun ca. 20 km. I dette tynde lag konkurrerer og vekselvirker de forskellige livsformer og påvirker derved deres omgivelser. Kun de nederste 40 km af atmosfæren har interesse i forureningshenseende.

Foto: NASA, Goddard Space Flight center.



Figur 2-1
En væsentlig del af stofferne
i atmosfæren stammer fra
naturlige kilder.

Foto øverst: Ukendt
Foto nederst: Britta Munter

Atmosfærens sammensætning og opbygning

Jorden er omgivet af en kappe af luftarter: atmosfæren. Op til omkring 100 km's højde er dens basale, relative sammensætning stort set konstant, selv om der sker et kraftigt fald i trykket. Regnet efter luftvolumen indeholder atmosfæren knap 21 % ilt, 78 % kvælstof, knap 1 % argon og mindre mængder af en lang række andre stoffer. Selv luft, der er upåvirket af menneskelige aktiviteter, vil indeholde stoffer, som indgår i luftforurening – fx svovldioxid fra vulkaner og kulbrinter fra afdampning fra vegetation.

Denne sammensætning har atmosfæren ikke haft altid. Oprindeligt var der meget kuldioxid og næsten ingen ilt, men da der for små 4 milliarder år siden opstod liv, medførte det en gradvis ændring. Paradoksalt nok var det den lave iltindhold i den tidlige atmosfære, der gjorde det første liv muligt. Fremkomsten af grønne planter, der ved hjælp af fotosyntesen omdanner kuldioxid til ilt og organisk materiale, var en katastrofe for de primitive organismer, som var udviklet i en iltfattig atmosfære. De er nu henvist til at leve i jorden, i sø- og havaflejringer og i forskellige dyrs tarmkanal.

En stor del af det organiske materiale er blevet omdannet og gemt i form af kul, olie og gas. Når vi afbrænder dette fossile brændsel, dannes der igen kuldioxid, som sendes tilbage til atmosfæren. Men nu kan det, som det vil blive beskrevet senere, give store problemer.

Gaia-teorien

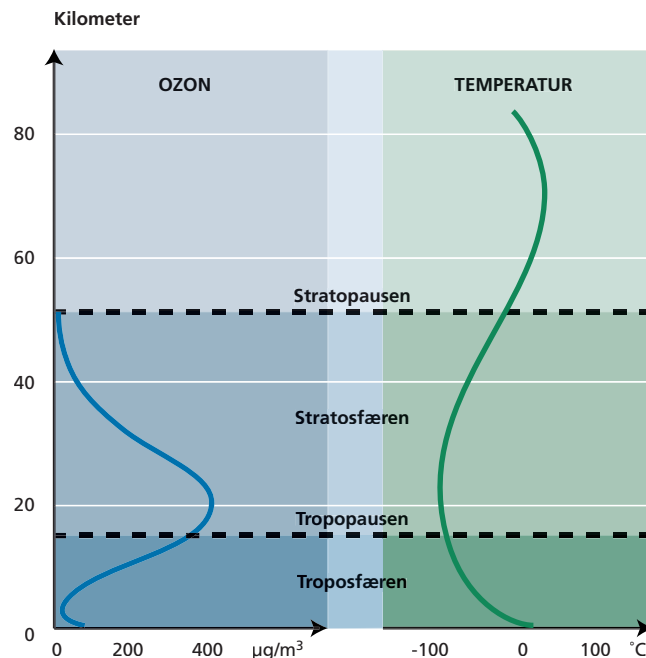
Atmosfærens sammensætning er altså i høj grad betinget af det liv, der har udviklet sig. Atmosfærens udvikling og det faktum, at Jorden trods kraftige omvæltninger har været i stand til uafbrudt at opretholde liv i næsten 4 milliarder år, har fået den engelske forsker og videnskabsfilosof James Lovelock til at fremsætte den idé, at hele biosfæren kan opfattes som én organisme, »Gaia« (den græske mytologis »Moder Jord«), der regulerer sine egne livsbetingelser. Ondskabsfuldt (men vel ikke helt ved siden af) har nogen sammenlignet det moderne menneske, der næppe har eksisteret i større antal i mere end 50.000 år, med en kræftsvulst, der i sin uahæmmede vækst truer med at dræbe den organisme, som er forudsætningen for dens egen eksistens.

Atmosfærens lagdeling

Sideløbende med væksten i iltindholdet i atmosfæren opstod en væsentlig undtagelse fra dens ensartede sammensætning – det såkaldte ozonlag. Solens UV-stråling spaltes iltmolekyler (O_2) i iltatomer (O), der reagerer med iltmolekyler og danner ozon (O_3). Processen afhænger både af strålingsintensiteten, der stiger med højden, og af trykket, der falder med højden. Resultatet er, at der dannes mest ozon i en højde af 10-15 km.

Dette er en af grundene til, at atmosfæren er opdelt i lag, der karakteriseres ved faldende eller stigende temperatur (figur 2-2).

Det er kun de nederste lag, der har interesse i forbindelse med luftforurening. I troposfæren, der er nærmest Jorden, og hvor alle vejrfænomener udspiller sig, falder temperaturen generelt med højden. I stratosfæren derimod stiger den igen på grund af energiabsorption i ozonlaget. Det er således lidt misvisende at tale om et ozonlag i stratosfæren, det er faktisk ozonlaget, der skaber stratosfæren ved at indføre en temperaturstigning (inversion), der forhindrer lodret opblanding af den nedenunderliggende kolde luft – ganske på samme måde som de lavtliggende inversioner, der kan give anledning til smogepisoder ved i praksis at lægge et låg over forureningen.



Figur 2-2
Ozonkoncentrationen og temperaturfordelingen i den nederste del af atmosfæren. Energiabsorptionen i ozonlaget giver anledning til den temperaturinversion (invers = omvendt; midlertidig stigende temperatur med højden), der skaber stratosfæren. Skillelinjen mellem troposfæren og stratosfæren kaldes tropopausen.

Den nederste del af troposfæren, hvor luftbevægelserne direkte påvirkes af jordoverfladen, kaldes det planetare grænselag. Dets højde varierer med tidspunktet på døgnet; om dagen kan højden være op til et par km, men om natten afgrænses bevægelserne, og der dannes ofte et inversionslag, der typisk starter 200 m oppe, og undertiden kan gå helt ned til jordoverfladen. Mange luftforureningsfænomener foregår udelukkende i dette grænselag.

Stofkredsløb

Selv i »naturlig« ren luft er det ikke de samme molekyler, der optræder hele tiden. Alle indgår i globale stofkredsløb med omsætningstider, der varierer fra sekunder til århundreder. I princippet kan man beskrive situationen som vist på figur 2-3, hvor forholdet mellem stofmængderne i to beholdere er bestemt af transporthastigheden mellem de to beholdere.

I praksis er det hele langt mere kompliceret, fordi der er mange transportveje, og fordi stofferne kan omdannes undervejs. Det fremgår af det globale kulstofkredsløb (figur 2-4).

Luftforurenende stoffer, der i de allerfleste tilfælde består af ganske almindelige kemiske forbindelser, vil indgå i disse kredsløb. Luftforurening består ganske enkelt i, at nogle stoffer optræder i generende koncentrationer på ubekvemme steder.

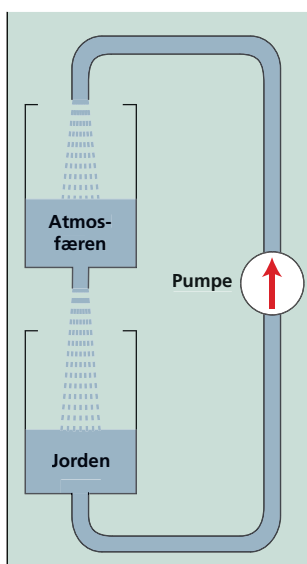
I den simple model svarer luftforurening fra menneskelige aktiviteter til, at pumpen kører hurtigere, så der kommer mere stof i den øverste beholder. I den virkelige verden er den geografiske udstrækning af denne forskydning (forureningen) bestemt af stoffernes omsætningstid, der afgør, hvor langt de kan transporteres, før de igen fjernes fra atmosfæren. Resultatet af disse fjernelsesprocesser kan være, at der dannes nye (sekundære) luftforureninger.

Hvis stofferne afsættes på Jordens overflade, kan de her give anledning til vand- eller jordforurening.

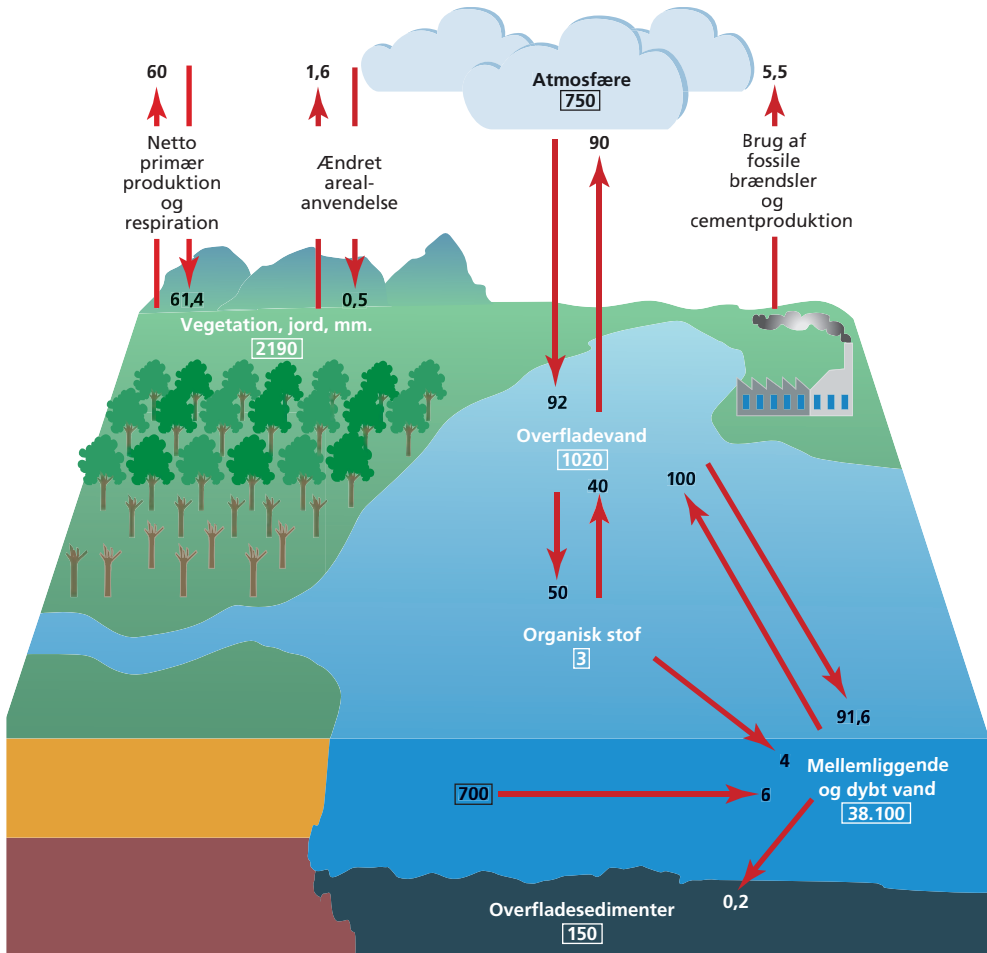
For flere stoffer er kredsløbene imidlertid ikke konstante. Der udsendes mere end der afsættes, og koncentrationen i atmosfæren stiger. Det gælder fx for kuldioxid.

Luftforureningens spredning

Luftforureningens spredning i atmosfæren er til dels bestemt af omgivelserne. I et lukket rum er der ingen spredning, imel-



Figur 2-3
Primitiv model af stofcirkulationen mellem atmosfæren og Jorden. Pumpen pumper væske op i den øverste beholder (atmosfæren), indtil trykket i bunden af den er så stort, at der løber lige så meget ned i den nederste beholder (Jorden), som der pumpes op.



Figur 2-4
Forenklet fremstilling af det globale kulstofkredsløb. Tallene i rammer er kulstofindholdet målt i Gigaton kulstof. Tallene på pilene er transporter i Gigaton pr. år. 1 Gigaton er 1.000.000.000 tons.

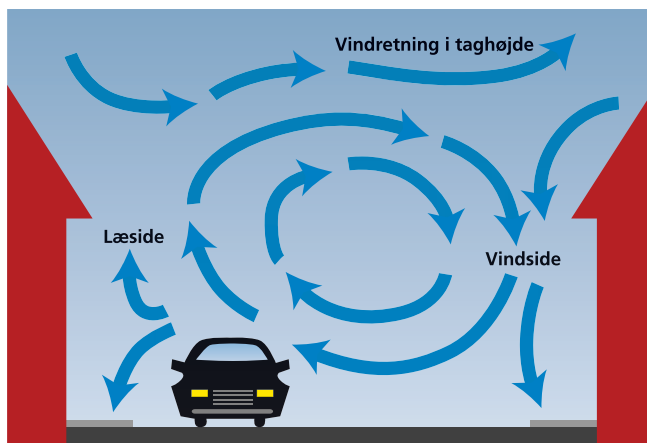
Opstillet af IPCC (The Intergovernmental Panel of Climate Change, Det Mellemstatslige Klimapanel) på basis af flere kilder.

lem to husrækker (figur 2-5) er den ringe, og i et åbent, fladt landskab er den god. Afgørende er imidlertid også de meteorologiske forhold, specielt vinden.

I Europa påvirkes vinden af flere faktorer: Jordens rotation; den store temperaturforskel mellem polarluften mod nord og den subtropiske luft i syd; fordelingen af land og hav, specielt med Atlanterhavet mod vest; og endelig de forhindringer, som udgøres af de store bjergkæder, specielt Alperne. Jordens rotation bevirker, at der i det meste af Europa er en dominerende vind fra vest; det betyder, at forureningen fortrinsvis blæser samme vej.

Mange forurenende stoffer (fx svovl- og kvælstofforbindelser) har omsætningsstider af størrelsesordenen dage. Med

Figur 2-5
Forureningens spredning i lukkede gaderum er ringe.



typiske vindhastigheder på 5 m/sek. kan de derfor spredes over områder som hele Europa. Andre stoffer (fx kuldioxid) bliver i atmosfæren i mange år og kan spredes over hele kloden. Samtidig betyder den lange levetid, at selv relativt små stofudslip gennem tiden kan opbygge store koncentrationsændringer i atmosfæren. Selv om de menneskeskabte kuldioxidudslip, som det fremgår af figur 2-4, kun udgør få procent af de naturlige stofstrømme, kan de derfor over en år-række betyde drastiske ændringer.

Modelberegninger

Målinger af luftforureningers spredning er normalt dyre, tidskrævende og følgelig begrænset til nogle få udvalgte lokaliteter; derfor benyttes ofte modelberegninger. De går meget forenklet ud på, at man bestemmer forureningsudslip og meteorologiske forhold, som fx vindstyrke og vindretning, og derefter lader en computer finde ud af, hvor forureningen blæser hen.

Metoden har to store fordele frem for direkte målinger: For det første er den som nævnt meget billigere og hurtigere, og den giver mere detaljerede oplysninger. For det andet behøver de data, man benytter, ikke at svare til den virkelige verden; man kan derfor fx beregne, hvad forureningen vil blive, hvis man bygger et kraftværk et givet sted – eller reducerer forureningsudslippet i hele Europa som følge af internationale aftaler.

Man kan også beregne, hvordan forureningen var i gamle dage. Det er selvfølgelig noget mere usikkert, fordi input-dataene, der normalt baseres på brændsels- og råstofregn-

skaber, er mangelfulde, og fordi der ikke er mulighed for at kontrollere, om man har regnet rigtigt. Det er også normalt nødvendigt at benytte nutidige meteorologiske data. Men man får alligevel et vist indtryk af forholdene.

Der findes modeller til mange forskellige formål. Modeller til beskrivelse af forurening i gaderum skal selvfølgelig have en helt anden rumlig og tidsmæssig opløsning end modeller til beskrivelse af fænomener i byskala eller langtransport. Men de er alle baseret på meteorologiske observationer og opgørelser af forureningsudslip.



Figur 2-6
Omgivelserne er afgørende for, hvilken forurening et givet udslip giver anledning til. I et lukket gaderum vil forureningen alt andet lige blive værre end langs en åben motorvej.

Fotos: Britta Munter.



Byen



Luftforureningen i fortidens byer kunne være langt større end den er i dag – omend sammensætningen var lidt anderledes. Billedet viser Købmagergade i København omkring 1865.

Foto: Wilhelm Tillge.

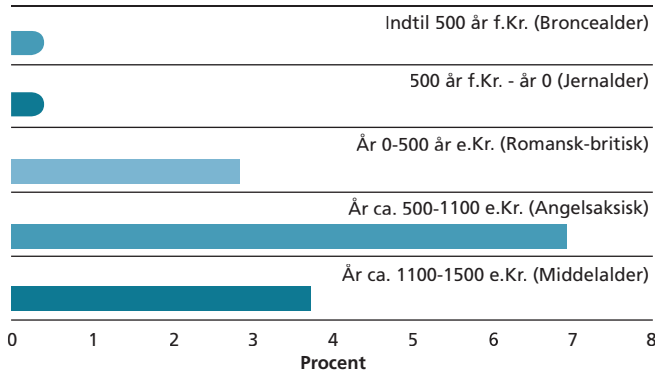
Luftforurening starter indendørs

Den alvorligste tidlige luftforurening har helt klart været indendørs, hvad der næppe kan overraske nogen, der har set rekonstruktioner af huse med åbne ildsteder og aftræk i loftet (figur 3-1). Man har således bl.a. undersøgt kranier fra førindustrielle begravelsespladser og har registreret hyppigheden af bihulebetændelse, som kan udløses af luftforurening og i alvorlige tilfælde kan angribe knoglerne. Man har her fundet en særlig stor hyppighed i tiden op til år 1000, dvs. før den såkaldte middelaldervarme satte ind, og i en periode hvor folk var mere inde, fyrede mere og luftede mindre ud (figur 3-2).



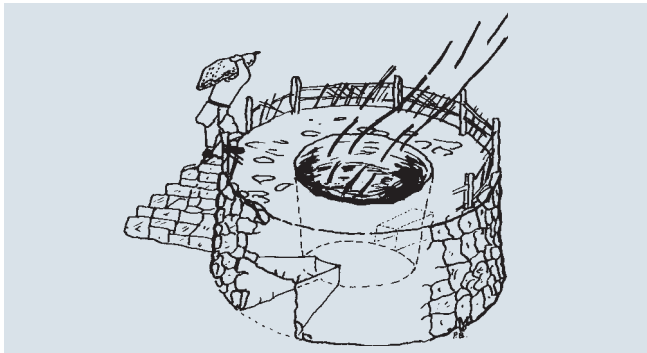
Figur 3-1
Rekonstrueret Jernalderhus på Forsøgsstation Lejre. Det åbne bål inde i huset giver en forurening, der er mindst lige så stor som på Rådhuspladsen i København.

Foto: Klima-X-forsøget, Lejre Forsøgscenter.



Figur 3-2
Hyppigheden af tegn på bi-
hulebetændelse i kranier fra
engelske begravelsespladser.

Efter: P. Brimblecombe:
The big smoke, 1987.



Figur 3-3
Kalkbrænding var en væsent-
lig kilde til luftforurening i
Middelalderen. Oprindeligt
blev der fyret med træ, men i
midten af 1200-tallet gik man
over til kul, med stigende
svovlforurening som resultat.

Efter: P. Brimblecombe:
The big smoke, 1987.

Det forurenede England

Det generelle danske ord »forurening« er temmeligt blodfattigt og af ny dato. Så er der mere stil over det engelske »pollution«, der er afledt af det latinske »polluo« med betydningen tilsmudse, besudle, vanhellige og krænke. Men der har tilsyneladende også været langt mere forurenede i England.

Tidlig byforurening

I en – på én gang underholdende og saglig – bog fra 1987 (»The big smoke«) behandler den engelske miljøforsker Peter Brimblecombe luftforureningen i England – og specielt London – fra omkring år 1000 og op til nu. Man har bl.a. undersøgt over 2000 skeletter fra et industrikvarter i York og omliggende landområde. Det viste sig, at 58 % af dem, der havde været begravet i byen mellem år 1000 og 1600 havde haft bihulebetændelse. Her har man specielt mistænkt et kalkbrænderi, der blev anlagt i 1200-tallet i forbindelse med bygningen af byens store katedral.

Indirekte oplysninger fra mange kilder

Også fra helt andre kilder kan man få oplysninger om forurening og klima; fx er det observeret, at en overskyet himmel er langt hyppigere på engelske malerier end på malerier fra det øvrige Europa. Mere kuriøst har det været foreslået, at man skulle undersøge damemoder, der i England syntes at være præget af mindre lyse farver – måske som en fornuftig tilpasning. Projektet blev dog opgivet, angiveligt fordi man fandt sammenhængen mellem fornuft og damemoder utilstrækkeligt dokumenteret. Det er dog velkendt at i gamle dage var alle paraplyer sorte.

Samme skæbne fik et forslag, der gik ud på at måle tonehøjden i gamle kirkeklokker. Angreb af luftforurening fjerner materiale og giver dermed en ændring af tonen, som skulle være et mål for forureningsbelastningen. Desværre viste det sig, at kammertonen gennem tiderne har ændret sig så meget, at det helt ville overskygge et eventuelt måleresultat.



Figur 3-4

Selv damemoder, her engelske fra 1844, har været overvejet som kilde til oplysninger om luftforurening.

London-smoggen

I århundreder var London med sine rygende skorstene symbolet på den forurenede storby. Allerede omkring år 1300 blev der nedsat en kommission, der skulle se på luftforureningen fra afbrændingen af kul i London. Noget tyder dog på, at dens bestemmelser stort set er blevet ignoreret. En ofte citeret historie om, at en miljøsnyder i 1307 skulle være blevet torteret, hængt og/eller halshugget har desværre ikke kunnet bekræftes i primære kilder. (Også dengang slap sådan nogen åbenbart alt for billigt!).

Skader på sundhed og materialer

I midten af 1600-tallet skete der en kraftig stigning i antallet af dødsfald som følge af den såkaldte engelske syge, der muligvis har forbindelse med reduktionen af sollys som følge af det næsten konstant tågede vejr om vinteren. Samtidig konstaterede man en kraftig nedbrydning af bygninger og kunstværker. I 1661 skrev John Evelyn således, at byluften

»angriber jernbjælker og de hårdeste sten med de gennemtrængende og bitre gasser, som følger med dens svøvl, og giver mere skade på et år end den rene luft på landet kan forårsage på flere hundrede«.

Tågen i kriminallitteraturen

Den berygtede Londontåge bliver et vigtigt element i den tidlige kriminalroman som fx i Dr. Jekyll og Mr. Hyde (1885), hvor man kan læse:

»Klokken var efterhånden blevet ni, og det var tåge – årets første rigtige tåge ... Medens drosken sneglede sig fra gade til gade, så sagfører Utterson en vidunderlig mængde af grader og afskygninger af halvløys; for et sted var det så mørkt som langt ud på aftenen.«

Der er her tale om et rent byfænomen. I Conan Doyles »De fires tegn« (1890) drager Sherlock Holmes, Dr. Watson og Miss Morstan således ud på en tåget september aften, men da de passerer Norwood (10-15 km fra centrum), er tågen langt bag dem.



Figur 3-5

Ved en berygtet smog-episode i London, december 1952 var sigtbarheden reduceret til få meter. Forureningsniveauet nåede op omkring 100 gange det, man ser i København i dag. Maksimumsværdierne for SO_2 og sod var knap 2 mg/m^3 . I flere dage var dødeligheden tre gange over det normale. Det gav stødet til den senere »Clean Air Act«.

Efter: E.T. Wilkins, J. Roy. Sanit. Inst. 74, 1 (1954)

Industriforurening og »The Alkali Act«

Den åbenlyse »smog« (efter en sammentrækning af det engelske »smoke« og »fog«), der i det væsentlige skyldtes afbrænding til opvarmning, var dog ikke det eneste problem. Den kemiske industri gjorde sig også gældende, specielt ved produktionen af alkaliske salte som fx natriumsulfat, der anvendes ved glasfremstilling. Som et biprodukt opstod saltsyre, der blev sluppet direkte ud i luften.

I 1863 vedtog Parlamentet den såkaldte »Alkali Act« og R. A. Smith blev ansat som den første »General Inspektør of Alkali Works For the Government« – en art direktør for miljøstyrelsen. Foruden sit administrative arbejde var Smith aktivt engageret i videnskabeligt arbejde, som kulminerede med offentliggørelsen af de første direkte målinger i en nu klassisk bog »Air and Rain« fra 1872.

Modelberegninger

Foreløbig var der dog ikke tale om egentlige bymålinger, men her er det muligt at få mere kvantitative oplysninger ved hjælp af modelberegninger baseret på brændselsforbrug. Det viser sig, at det generelle niveau for svovldioxid i London allerede omkring år 1700 må have været oppe på 150 mikrogram pr. kubikmeter, og at det først begyndte at falde efter år 1900.

Man skal være meget varsom med at sammenligne fra by til by, men umiddelbart er dette omkring 30 gange så meget, som vi måler i Københavns centrum i dag. I Londons centrum har man helt op til midten af 1960'erne målt årsmiddelværdier omkring 300 mikrogram pr. kubikmeter.

»Smog-episoder« og »Clean Air Act«

Ét er imidlertid beregnede langtidsmiddelværdier, noget helt andet er de spidsbelastninger af forurening, som kunne optræde under de berygtede »smog-episoder«; her blev niveauerne under specielle vejrforhold op til 20 gange højere, og de kunne medføre en overdødelighed på flere hundrede mennesker om dagen.

Først efter et par katastrofale episoder efter 2. Verdenskrig (figur 3-5) blev der gennemført en lovgivning (The Clean Air Act), som har gjort London til en by, der i hvert fald ikke er værre end så mange andre europæiske storbyer. I dag skal man til byer som Mexico City eller Cairo for at se problemer, der bare minder om noget i den gamle størrelsesorden.

København

Hvordan har der så været i København i tiden inden industrialiseringen? Et vist indtryk kan man få fra tidens litteratur, der taler om den ulidelige stank fra latriner, husdyrhold, garverier osv., men det giver ikke noget kvantitativt indtryk af den egentlige luftforurening.

Forpestet Luft.

Luften er det Element, som vi ere bestemte til at leve i. Ligesaa nødvendigt som det er, at de Fødemidler, vi skulde nyde, ere sunde, saaa nødvendigt er det og, at den Luft, vi skulle indaande, er sund. Men hvor ligegyldig er man ikke i den Henseende? — Man vaager strengeligen over, at Ingen sælger fordærvede Fødevarer, men man synes kun at bryde sig lidet om, at Luften paa tusinde Maader for-dærves.

Figur 3-6

Myndighedernes indsats synes ikke at imponere forfatteren til denne artikel i »Politikvennen« fra 1841.

Modelberegninger

For at belyse spørgsmålet har DMU foretaget nogle enkle beregninger af luftforureningen i København omkring midten af 1800-tallet. Tidspunktet er ikke valgt helt tilfældigt. Man var begyndt at foretage opgørelser af brændselsforbrug (af toldmæssige grunde selvfølgelig) og vi ved derfor nogenlunde, hvor stort forureningsudslippet kan have været. På den anden side lå byen med sine omkring 130.000 indbyggere endnu i alt væsentligt inden for voldene, og vi ved derfor også, hvor forureningsudslippet skete. Hertil kommer, at industrien stadig var beskeden, og at man endnu ikke havde fået gas; det skete først i 1857. Alt i alt en regnemæssigt håndterlig situation.

Det generelle niveau af svovldioxidforureningen synes, i byens centrum, at have været mindst 10 gange højere end det er nu, og dermed måske noget, der minder om det halve af det, der var i London. Da København også den gang var langt mindre end London, og vejrforholdene gunstigere, har den endvidere altid været forskånet for de store spidsbelastninger under smog-episoder.

Forureningen med kulbrinter har måske været 10 gange højere end den er nu. I dén henseende var datidens brænde- og tørvefyr værre end nutidens biler. Til gengæld har der næppe været den store forurening med kvælstofoxider, der fortrinsvis dannes ved høj forbrændingstemperatur som fx i

Figur 3-7

Søren Kierkegaards, H.C. Andersens og Grundtvigs København (her i 1839) lå indtil 1855 i alt væsentligt indesluttet af sine volde.

Ved en simpel, overslagsmæssig modelberegning af luftforureningen går man ud fra, at alt indført brændsel er blevet anvendt til rumopvarmning, og man fordeler derfor udslipene efter bebyggelsen.

Beregningerne er udført af Per Løfstrøm, DMU.

eksplosionsmotorer. Luftforureningen i København har altså været lidt anderledes sammensat, end den er i dag, men luften har bestemt ikke været sundere – og umiddelbart langt ubehageligere. Og så har vi slet ikke talt om lugtproblemer!

Det skal dog nævnes, at man i de senere år er blevet opmærksom på ultrafine partikler fra dieseltrafik som en mulig alvorlig sundhedsrisiko. Den slags partikler kan også komme fra brændefyr.

Byens vækst

Vi har ingen konkrete oplysninger om luftforureningen i København i den følgende tid, men industrialiseringen, der tog fart i 1870'erne, og den hastige vækst i befolkning og areal, efter at voldene var faldet, kan ikke have forbedret situationen. I 1908 skrev dr. med. Poul Hertz således i Månedskrift for Sundhedspleje:



»Ser man en stille Sommereftermiddag fra Brønshøj Bakke ud over København, ligger der henover den en grålig Sky, som udoisker Konturerne og indskrænker Synskredsen. Det er Kulrøgen, som Luften er tilsat med, paa den nævnte Tid af Aaret næsten udelukkende Røgen fra Fabrikkerne, og Taagens Kilder tegner sig som sorte Røgslør fra de talrige høje Skorstene, disse slanke Minareter, der er karakteristiske for en Nytidsbys Profil«.

Tonen antyder, at han ikke er helt fri for at være lidt imponeret af synet. Men hvordan har der ikke været om vinteren, når der også blev fyret til opvarmning, og hvor spredningsforholdene af meteorologiske grunde var ringere?

Figur 3-8

Gadebillede fra København i midten af 1800-tallet. Luftforurening har ikke været det eneste miljøproblem.

Tegning af C.N.M. Klæstrup.



Problemer og løsninger i København

Hvordan er det så senere gået med luften i København? Ser man på det samlede danske udslip af svovldioxid (side 50), var det i slutningen af forrige århundrede omkring 25.000 tons om året, det toppede omkring 1970 med ca. 600.000 tons om året og er nu som følge af internationale aftaler og en række indgreb igen nede omkring 25.000 tons om året. Det antyder selvfølgelig nogle tendenser, men det siger ikke nok, når det gælder lokal forurening; her er det også et spørgsmål om kildernes tæthed, skorstenenes højde o.m.a.

Figur 3-9

Saly's ryttermonument for Frederik V på Amalienborg Slotsplads i København. Det blev opstillet i 1770, og er her fotograferet i 1982. Det er helt dækket af korrosionsprodukter.

Foto: Boligministeriet.



Materialeskader

Man kan støtte sig til indirekte oplysninger. Måske det mest åbenlyse tegn på luftforurening er nedbrydningen af materialer, der er dokumenteret med fotografier siden slutningen af forrige århundrede.

Temperatursvingninger, frostsprængninger, svampeangreb og andre naturlige fænomener vil altid bevirke, at materialer nedbrydes, men nogle forurenende stoffer gør processen uacceptabelt hurtig. Den alvorligste forurening er byluftens

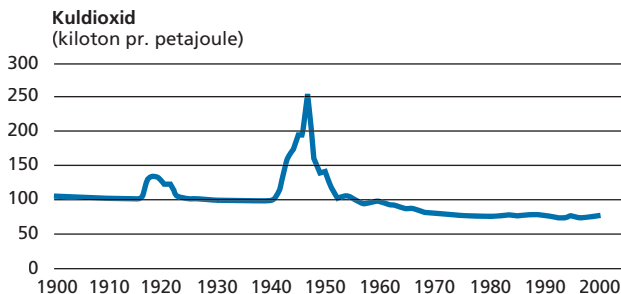
svovldioxid, der angriber både metaller og sten – i særdeleshed hvis de er fugtige. Værst går det ud over kulturgenstande, hvor værdien kan ligge i et tyndt overfladelag. Særligt udsatte er de historiske bygningers ornamenter, der ofte er udført i en blød sandsten. Stenens bindemiddel omdannes til gips, som vaskes af med regn. Hvis stenen er porøs, kan der endvidere i dens indre dannes salte, som udvider sig og forårsager sprængninger.

Også bronzestatuer angribes og dækkes efterhånden af et lag af basisk kobbersulfat, der i modsætning til ir (kobberkarbonat) ikke beskytter mod videre angreb. Figur 3-9 viser Saly's ryttermonument for Frederik V på Amalienborg Slotsplads. Det blev opstillet i 1770 og er her vist i en gengivelse fra 1982. Monumentet havde 50 år tidligere endnu den originale bronzeoverflade med tydelige værktøjsspor, men dén er nu kun tilbage på hestens bug. De væsentligste angreb synes altså at være sket i de senere år, og man kan deraf slutte, at forureningsniveauet har været relativt højt, lige før der blev udført egentlige målinger.

Tidlige målinger

I midten af 1940'erne undersøgte en komité nedsat af Akademiet for de tekniske Videnskaber »den atmosfæriske forurening som følge af den stigende industrialisering«. Resultaterne kan ikke umiddelbart sammenlignes med moderne målinger, men viste tilsyneladende, at København i visse henseender var mere forurenede end London.

Utvivlsomt hang det sammen med den unormale situation i slutningen af, og umiddelbart efter, 2. Verdenskrig med brug af store mængder brunkul og tørv. Senere opgørelser af det danske udslip af kuldioxid pr. produceret energimængde har vist, at det i krigsårene steg til mere end det dobbelte (figur 3-10). Noget tilsvarende må formodes at have været tilfældet for svovldioxid og støv.



Figur 3-10

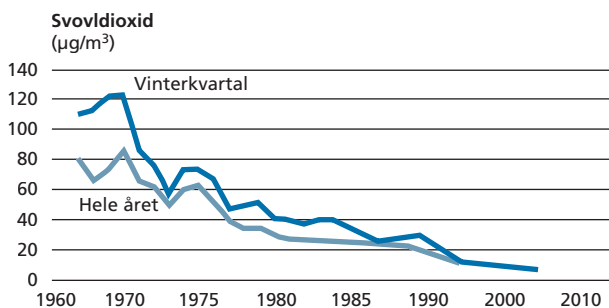
Forholdet mellem dansk udslip af kuldioxid og den producerede bruttoenergi. Man bemærker stigningen under 1. og i særdeleshed 2. Verdenskrig.

Data fra Erik Runge, DMU.

Figur 3-11

I København var forureningen med svovldioxid omkring 1970 som årsmiddel ca. $80 \mu\text{g}/\text{m}^3$ og om vinteren oppe på $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$. I dag er den reduceret til under en tiendedel og dermed langt under Verdens Sundheds Organisation, WHO's vejledende grænseværdi på $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$.

Data: DMU



Systematiske målinger

Man har først systematiske danske målinger fra slutningen af tresserne og specielt efter etableringen af det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP) i begyndelsen af 1980'erne. Den længste tidsserie findes for svovldioxid (figur 3-11), hvis årsmiddelværdi i Københavns centrum er faldet støt fra omkring 80 mikrogram per kubikmeter i midten af 1960'erne til nu under 5. Det skyldes dels lovgivning om begrænsning af svovl i brændsler, dels en ændring i fyringsteknik – herunder en overgang til fjernvarme, hvor store anlæg med høje skorstene spreder forureningen ud af byen.

Forureningen med partikler (målt som sod, figur 3-12) er faldet tilsvarende, dog med en mindre stigning i begyndelsen af 1980'erne, som kan hænge sammen med øget brug af kul.

Situationen i de senere år

Luftforureningen i København er i visse henseender kommet under kontrol, men den har samtidig i de senere år skiftet karakter. Den skyldes nu, som i andre industrialiserede lande, i det væsentlige den stigende biltrafik, der i byområder er den dominerende kilde til kvælstofoxider, kulilte og kulbrinter. Udslippet af disse tre forureninger er reduceret med anvendelse af katalysatorer, der i Danmark er lovpligtige på alle benzinbiler indregistreret efter 1. okt. 1990. Virkningen er dog endnu delvist modvirket af en stigende trafikmængde.

Som i de andre vestlige storbyer er blyforureningen derimod faldet drastisk med udfasningen af blyadditiver i motorbenzin, der dels er gennemført, fordi bly er giftig i sig selv, dels fordi bly forgifter katalysatorer.

Fjernelsen af bly fra benzin har dog ikke været helt uden bivirkninger, idet man i første omgang søgte at opretholde benzinenes oktantal ved at forøge indholdet af aromatiske kulbrinter – specielt benzen – og MTBE, der kan være kræftfremkaldende.

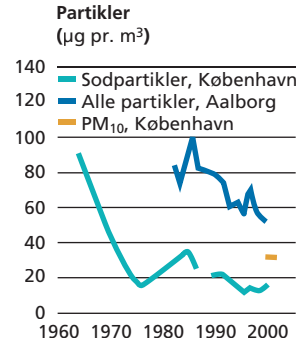
I trafikerede gader blev der i 1996 målt benzenniveauer omkring $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$, og det blev påvist at årsagen stort set kun var benzinen indhold af benzen. Raffinaderierne var imidlertid indstillet på hurtigt at producere benzin med lavt indhold af benzen, og fra år 2000 er der indført EU-regler, som begrænser benzins indhold til højest 1 %. Niveauerne er nu nede på under $4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ eller under EU's grænseværdi på $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ gældende fra 2005.

Små partikler

I de senere år har der været stigende interesse for små partikler. Mange udenlandske undersøgelser har vist sammenhæng mellem forurening med partikler og livslængde, og tilsyneladende falder den gennemsnitlige levealder med 0,4-0,6 år pr. $10 \mu\text{g}$ pr. m^3 PM_{10} (partikler med en diameter under $10 \mu\text{m}$). Meget tyder dog på, at den virkelige risiko er ultrafine partikler (diameter mindre end $0,1 \mu\text{m}$).

I Danmark har mængden kun været målt i nogle år, og man har endnu ikke kunnet konstatere nogen udviklingstendens (figur 3-12). Der er dog næppe tvivl om, at der er tale om et stort problem.

Den sekundære forurening ozon, der beskrives senere, er et alvorligt byproblem i sydligere lande, men er det ikke i Danmark.



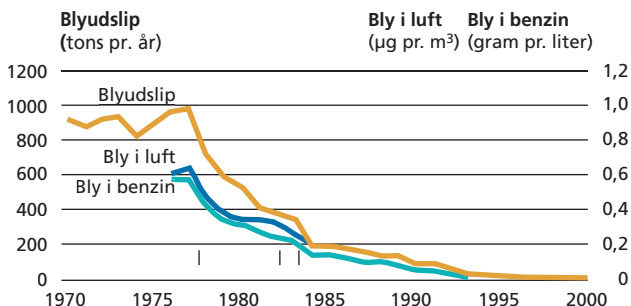
Figur 3-12

Partikler i byluft. Udslippet af sod og større partikler er blevet kraftigt reduceret ved brug af renere brændsler, samt forbedret fyrings- og rensningsteknologi, og niveauerne i danske byområder er faldet tilsvarende. For de helt små partikler (PM_{10}) er måleperioden for kort til at vise nogen tendens.

Data: HLU og DMU

Udviklingen i Europa

I en statistik (Advanced Air Quality Indicators) opgør OECD den generelle udvikling i europæiske byer således: Blyforureningen er klart faldende, kulilteforureningen er stort set uændret, kvælstofdioxidforureningen er svagt faldende og ozonforureningen er svagt stigende.



Figur 3-13

Udslippet af bly i Danmark er stort set forsvundet. Koncentrationen af bly i Københavns luft er faldet til under $1/10$ i løbet af de sidste 20 år. Det skyldes skærpede grænser for anvendelse af blyadditiver i motorbenzin (vist ved de tre små lodrette streger). I Danmark skyldes blyforurening af luften nu i alt væsentligt fjerntransport fra udenlandske industriområder.

Data: DMU



Figur 3-14

Biltrafikken er uden tvivl den moderne bys alvorligste miljøproblem. Ikke alene er den kilde til luftforurening, men også til støj, rystelser, ulykker og æstetisk belastning.

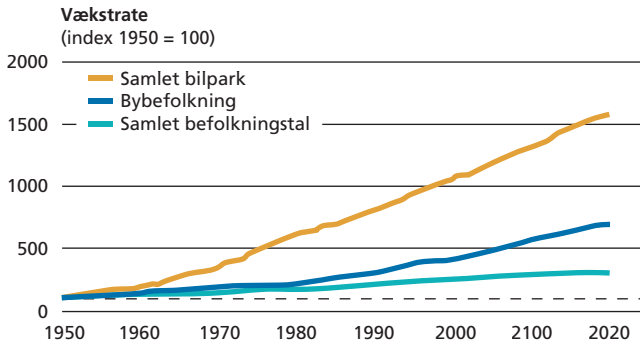
Foto: 2. maj, Sonja Iskov.

EU har beregnet, at med planlagte indgreb vil forureningen med kulilte, kulbrinter, kvælstofoxider og partikler i år 2010 være halveret i forhold til 1990 på trods af den forventede stigning i trafikken.

Den moderne storby

Alene siden 1950 er verdens befolkning mere end fordoblet, brøkdelen af personer, der lever i byer er vokset med 4 gange, og den globale bilpark er blevet ca. 10 gange større. Denne udvikling forventes at accelerere i de kommende år (figur 3-15).

Når det angår kilderne til luftforurening er verdens byer meget forskellige. I størstedelen af de industrialiserede lande udgør biler efterhånden hovedkilden, men i udviklingslandene er situationen mere blandet. I Latinamerika er der således flere biler end i fx Afrika, og i byer i tempererede områder (fx Kina og dele af Østeuropa) bruges kul og biomasse til privat opvarmning.



Figur 3-15

Anslået og forventet relativ vækst i verdens befolkning, urbanisering og bilpark i perioden 1950-2020.

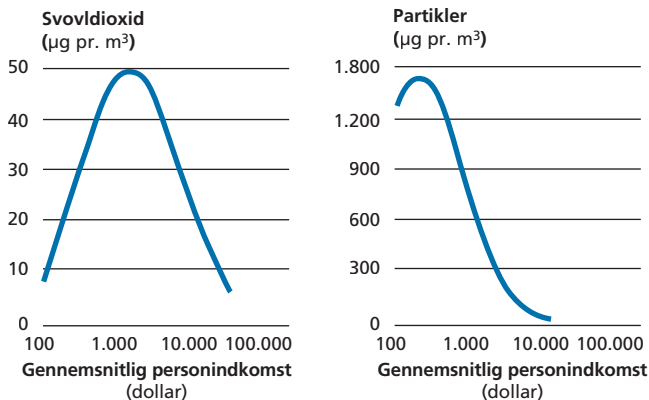
Efter: UNEP, WHO 1992.

Den store verden

Omkring 70 byområder i verden har befolkninger over 3 millioner. I år 2000 var Verdens største by Mexico City med over 24 millioner. Med sin befolkning på godt 1 million er København derfor på verdensplan en relativt lille by med håndterlige problemer – bl.a. på grund af et fladt terræn og rimelig blæst.

Gennem de sidste årtier har London, Los Angeles, New York og Tokyo reduceret deres luftforurening betragteligt. Men historien med en stigning i forureningsniveauet som følge af vækst og industrialisering gentager sig nu i udviklingslandene, hvor mange byer har nået samme forurening, som man så i London i 1950'erne.

Generelt synes forureningsniveauet i byområder først at stige med udviklingen og derefter igen at falde (figur 3-16).



Figur 3-16

Skematisk fremstilling af en typisk udvikling i luftforureningen i et byområde. Niveaulet stiger først med den økonomiske udvikling og falder derefter igen.

Efter: Mage et al. Atmos. Environ. 30. 681-686 (1996).



Forurening uden grænser



Man kan sprede forureningen fra stationære kilder som kraftværker og varmecentraler, men de forurenende stoffer bliver selvfølgelig ikke væk af den grund. Det var først i slutningen af 1960'erne, at langtransporteret luftforurening fik større videnskabelig og politisk interesse. Det egentlige gennembrud for en forståelse deraf kom med en FN-miljøkonference i 1972.

Foto: Highlight.

Figur 4-1

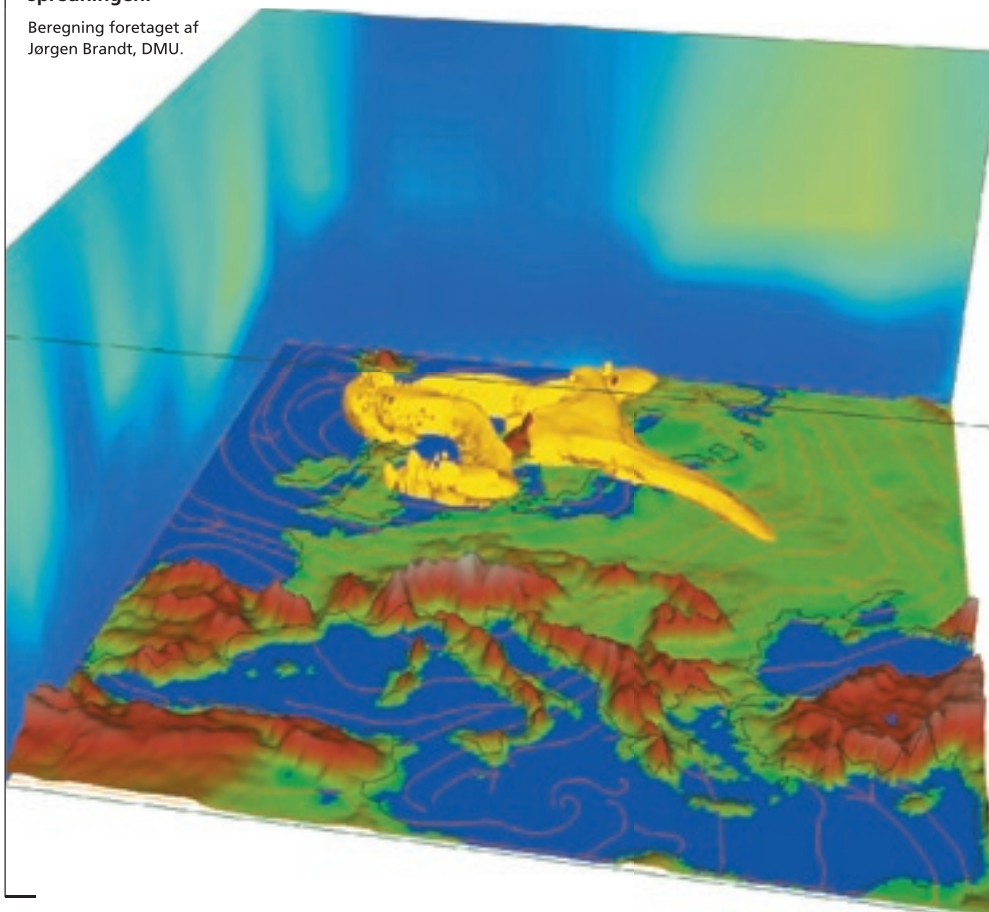
Computersimulering af et forureningsudslip fra et område i Midtengland med mange kraftværker. Udslippet antages at starte 23. oktober 1994 kl. 16.00, og røgfanen har allerede efter et døgn nået Danmark. Derefter bøjer den mod nordvest styret af et lavtryk over Færøerne. En del af forureningen spredes mod øst og når efter tre døgn Ukraine. Der er ikke her taget hensyn til omdannelse under spredningen.

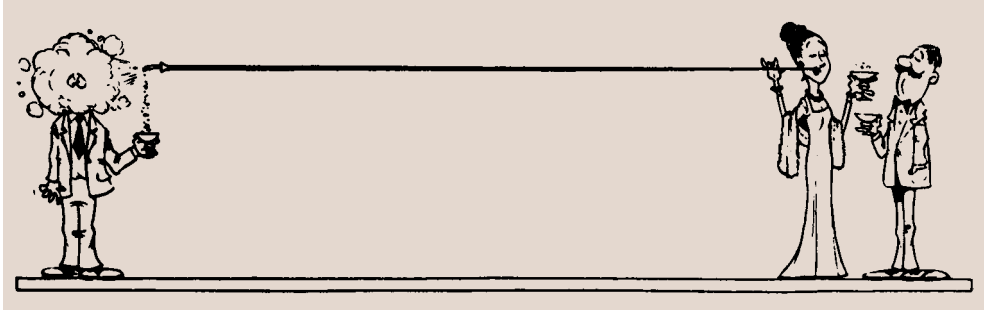
Beregning foretaget af Jørgen Brandt, DMU.

Langtransport

Med en typisk vindhastighed på 5-6 m/s kan luftforurening spredes ca. 500 km pr. døgn. Da mange gasformige luftforureninger i gennemsnit overlever nogle dage i atmosfæren, kan de derfor transporteres over områder så store som hele Europa. Alle lande kan af den grund forurene hinanden (figur 4-1), så problemerne kan kun løses i et internationalt samarbejde. Den model, der er anvendt til figur 4-1, beregner kun spredning. I praksis vil røgfanen også udtyndes, fordi forureningen afsættes på jordoverfladen – enten direkte eller via nedbør.

Man kan med sådanne metoder også beskrive, hvordan radioaktive stoffer, der jo er en form for luftforurening, udbredes.





Figur 4-2

Selv om alle lande i princippet forurener hos hinanden, er der afgjort vindere og tabere.

Tegning: EF-bladet Euroforum.

EMEP

I 1977 etableredes det såkaldte EMEP (European Monitoring and Evaluation Programme) som teknisk videnskabelig baggrund for De forenede Nationers Økonomiske Kommission for Europa (UNECE) forhandlinger om grænseoverskridende forurening. I EMEP opgøres forureningsudslip i net på 150 × 150 km eller 50 × 50 km, og man beregner med spredningsmodeller, hvor den udsendte forurening afsættes.

Danmarks rolle

Land	Svovl, ton	
	Eksport	Import
Tyskland	500	1.400
Storbritannien	100	5.300
Polen	800	2.300
Tjekkoslavakiet	100	600
Sverige	2.200	100
Norge	700	100
Finland	300	100

Figur 4-3

Nogle eksempler på Danmarks »import« og »eksport« af svovlforurening i 2000. Virkningen af den fremherskende vestenvind er tydelig. Vi modtager forurening fra England og sender selv forurening til Sverige.

Efter: EMEP Status Report 1/2003 part 3.

I dette spil er den overvejende vestenvind en fordel for Danmark, fordi de fleste af vore store byer ligger på østkyster, og forureningen derfor blæser ud af landet – bl.a. til Sverige (figur 4-3). En yderligere fordel er, at Danmark er opdelt af vandområder og derfor har en mindre kildetæthed end mange andre lande.

På den anden side vil en del forurening netop afsættes på indre vandområder, hvor fx luftbåren kvælstofforurening bidrager med en afgørende del af den totale kvælstoffbelastning. Den bliver dermed en vigtig faktor i det meget omtalte iltsvind med efterfølgende død af bunddyr og fisk.

Syreregnen

Selv før menneskene begyndte at forurene atmosfæren var nedbøren svagt sur – antagelig med et pH omkring 5,5. Det skyldes, at luften altid har indeholdt naturligt forekommende, forsurende stoffer, bl.a. fra vulkanudbrud.

En forsurening af nedbøren omkring større industrier blev først beskrevet af A. R. Smith i 1872, men blev i årene efter 2. Verdenskrig udbredt over arealer som hele Europa. Den rammer nu på grund af langtransport ikke kun industrialiserede områder.

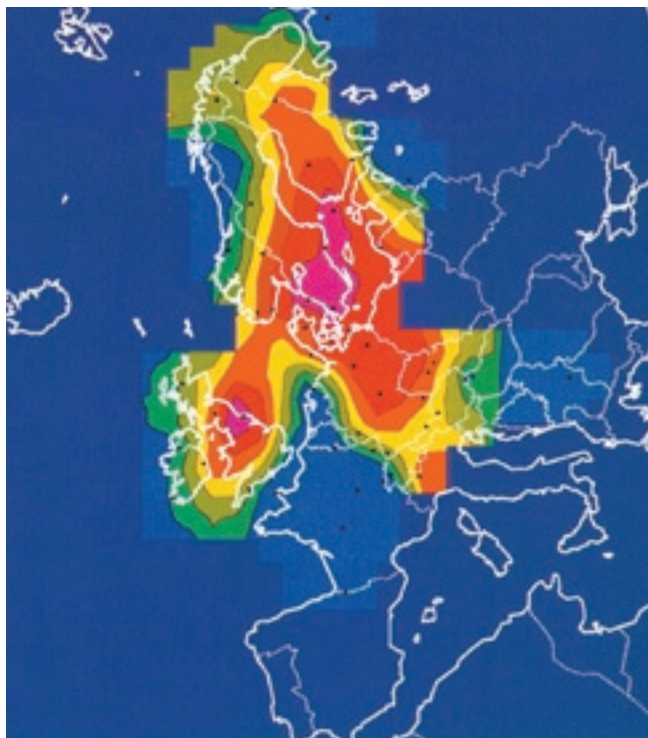
I store områder i det nordlige Europa var nedbørens pH nede omkring 4,5 i 1990'erne, dvs. den indeholdt 10 gange så mange brintioner som »naturlig« nedbør (figur 4-4).

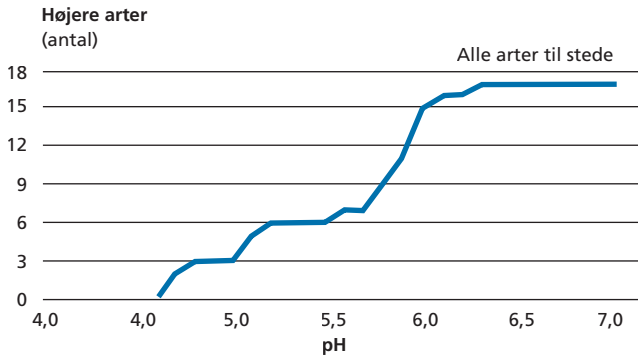
Årsagerne til sur nedbør

Sur nedbør har traditionelt været tilskrevet udslip af svovl- og kvælstofoxider, der i atmosfæren omdannes til henholdsvis svovlsyre og salpetersyre. Udslippene af disse forbindelser

Figur 4-4

Surhedsgraden af nedbør i Europa i 1993. Rent vand har pH 7, men regnvand vil altid være lidt surt. Man ser dog tydeligt, at der var væsentligt lavere værdier (svarende til større surhed) i de stærkest forurenede områder. Situationen er senere væsentligt forbedret.





Figur 4-5

Surhedsgraden i ferskvand er afgørende for, hvilket liv der kan trives. Under pH 4 vil der stort set kun være alger og insekter tilbage. Sådanne situationer har man set i mange svenske og norske søer.

begyndte at vokse allerede i midten af 1800-tallet og var absolut dominerende indtil efter 2. Verdenskrig.

Omkring 1950 begyndte udslip af ammoniak fra større dyrehold og gødningsanvendelse i landbruget imidlertid at få betydning. Umiddelbart vil ammoniakken neutralisere syrerne i atmosfæren ved at danne ammoniumsalte, hvorved nedbøren i første omgang bliver mindre sur. Efter at saltene er blevet afsat på jordoverfladen, vil ammoniumionerne imidlertid gennem en række reaktioner, der involverer optag i planter, kunne frigøre brintioner – og altså virke som syre.

Omkring 1980 var det globale udslip af ammoniak større end udslippet af kvælstofoxider – til trods for at dette fortsat var stigende som følge af den voksende trafik. Herved giver ammoniakforureningen på længere sigt et bidrag til forsuren i jorden, der er væsentligere end bidraget fra kvælstofoxider og sammenligneligt med bidraget fra svovldioxid.

Forsuring af ferskvand

Når den sure nedbør afsættes på søer, enten direkte eller via afstrømning fra det omgivende land, kan konsekvenserne være vidt forskellige afhængigt af jordbundsforholdene. I kalkrige områder vil søerne indeholde bikarbonat (HCO_3^-), der virker som stødpude og dermed modvirker forsuring. Dette er tilfældet for de fleste danske søer. På sandede jorde specielt i Midt- og Vestjylland kan der dog opstå problemer.

I Norge og Sverige er situationen alvorligere, og mange søer er blevet så sure, at levende organismer helt eller delvist uddør (figur 4-5). Det er dog ikke helt afklaret i hvilket omfang årsagen er den umiddelbare forsuring. En medvirkende årsag kan være den udvaskning af giftige metaller (bl.a. aluminium) fra jorden, der forøges, når vandet bliver mere surt.

Figur 4-6
Følsomme naturområder kan
belastes af luftforurening.

Foto: Morten Strandberg.



Overgødskning

Svovl- og i særdeleshed kvælstofforbindelser er naturlige næringsstoffer; derfor vil de generelt forøge plantevækst. Imidlertid reagerer forskellige planter forskelligt på den ekstra gødning. Resultatet bliver, at nogle plantearter fremmes, mens andre går tilbage. Oftest vil det medføre tab af artsmangfoldighed.

På landjorden er bevaringsværdige naturområder, som fx lyngheder tilpasset lave kvælstofkoncentrationer og dermed følsomme i den forstand, at de kan blive omdannet til græssteder.

I vandområder fører denne overgødskning, der også kan have andre årsager (bl.a. landbrugets spildevand), til en algevækst, der kan medføre iltsvind og fiskedød.

Kritisk belastning

Forskellige økosystemer er ikke lige følsomme over for luftforurening. Man har derfor indført begrebet »kritisk belastning«, der angiver, hvor meget et givet system kan udsættes for løbende, uden at tage væsentlig skade. Som »væsentligt« opererer man ofte med en skade på 5 %.

I Danmark udgør det samlede areal, hvor den kritiske belastning overskrides, kun en beskedent andel, men det inkluderer landbrugsjord, byer mv. Af det egentlige naturareal, der udgør 15-20 %, er omkring halvdelen belastet over tålegrænsen for eutrofiering. I de senere år synes der at have været en mindre reduktion, men nøjere opgørelser findes ikke.

Skovdøden

Der vil altid kunne forekomme omfattende skader på træbevoksninger som følge af frost, tørke, saltnedslag og angreb af svampe eller insekter. Og man har i århundreder vidst, at træer skades af luftforurening. I større industriområder fx i Ruhrdistriktet og i Midtengland har man således konstateret generel dårlig trivsel og trædød.

Figur 4-7
Døde træer i Tjekkoslaviet, april 1987.

Foto: Lennart Rasmussen.



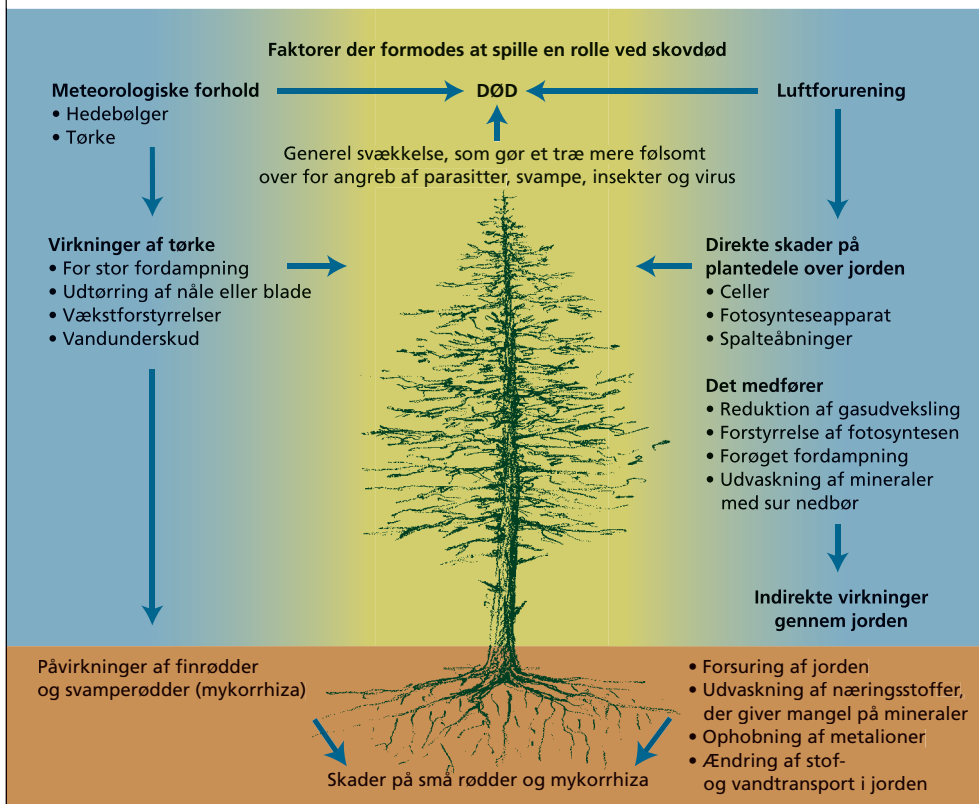
En ny type skader

I slutningen af 1970'erne begyndte der imidlertid at ske en svækkelse af skovene i Centraleuropa og Nordamerika i områder, som man normalt ville opfatte som renluftområder uden påvirkning fra lokale kilder. Det var en udbredt opfattelse, at der her var tale om en ny type skader, der måtte tilskrives ændringer i miljøet over lange tidsrum – bl.a. fordi mange forskellige træarter var påvirket. Hovedårsagen blev anset for at være forureningen med svovl- og kvælstofoxider, der både giver direkte skader og indirekte påvirkning gennem forsuring af nedbøren og jorden.

Skovøkosystemer er imidlertid meget sammensatte, og der syntes ikke nogen steder at have været tale om én klar årsag til de observerede svækkelser. Tværtimod vil en række forhold kunne spille sammen. Luftforurenings påvirkning kan fx bestå i, at den langsomt svækker træerne, så de bliver mere følsomme over for fx tørke eller insektangreb (figur 4-8).

Figur 4-8

Skematisk fremstilling af de mekanismer, som formodes at spille en rolle ved den såkaldte »skovdød«. Der er tale om et kompliceret samspil, hvor langtransporteret forurening kan være en udløsende faktor. Derfor kan det være vanskeligt at fastslå en klar årsagssammenhæng. Hertil kommer, at træer, der ser ens ud, kan have forskellige arveanlæg og dermed forskellig følsomhed.



I Centraleuropa synes hovedårsagen at have været svovlforurening, mens det i USA snarere har været fotokemisk luftforurening. En tredje mulig årsag er ammoniak fra landbruget. Da ammoniak er et gødningsstof, vil det i første omgang få træer til at vokse hurtigere, men dette vil på længere sigt kunne medføre mangel på andre næringsstoffer og forstyrre jordens syrebalance.

En påvirkning på retur – i Europa

I Tyskland har man nu konstateret, at den omfattende skovdød, som man frygtede i begyndelsen af 1980'erne, ikke er indtruffet. Forskellige skove har opført sig forskelligt, men generelt er der indtrådt en stabil situation. I Danmark er der observeret en generel forbedring af sundheden i nåleskovene.

Europæiske skove har de sidste årtier udviklet omkring 40 % mere ved, og »Skovdøden« som sådan synes altså at være vigende. Uden at man derfor har påvist en entydig årsagssammenhæng, kan man konstatere, at forbedringen er faldet i takt med svovlforureningens fald.

Ligesom udviklingslandenes byluft bliver mere og mere forurenede kan man nu forudse, at de vil bidrage mere og mere til puljen af langtransporteret luftforurening. Kinas voksende elproduktion, der fortrinsvis gennemføres med kulraft, vækker således bekymring for skovene i det sydlige Japan.

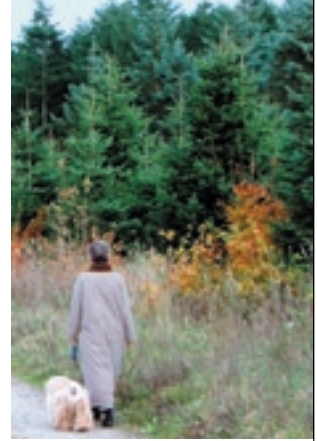
Historiske opgørelser af udslip

Som en del af det europæiske monitorings- og evalueringsprogram har man på basis af historiske udslipsgørelser rekonstrueret svovlforureningen i Europa siden 1880 (figur 4-10).

I hele perioden skete de største udslip i et bælte, der strækker sig fra Midtengland over Ruhrdistriktet og ind i Centraleuropa, og det var også her, forureningsniveauerne blev størst.

For det samlede Europa (figur 4-10a) steg udslippet til omkring ti gange så meget i hundredeåret fra 1880 til 1980 med midlertidige afdæmpninger under verdenskrigene og krisen i trediverne. Siden udslippet toppede omkring 1980 er der sket et fald som følge af de internationale aftaler om udslipsbegrænsninger, og udslippet ligger nu omkring det halve.

Udviklingen har ikke været helt den samme i de enkelte lande, og specielle forhold har gjort sig gældende i østlandene. I industrilandene Belgien, Tyskland og i særdeleshed England var der væsentlige udslip allerede i forrige århundrede, men



Figur 4-9

Den frygtede skovdød i Europa synes ikke at være indtruffet.

Foto: Britta Munter.

Figur 4-10

a) Samlede årlige europæiske udslip af svovldioxid siden 1880. Man ser en stigning op til omkring 1975, kun afbrudt af en afmatning under de to verdenskrige og depressionen i 1930'erne. Derefter sker der et fald i overensstemmelse med de internationale aftaler.

b) Udviklingen i det danske udslip af svovldioxid siden 1880. Væksten sker noget senere end i de store industrilande, og den efterfølgende reduktion er relativt større end i Europa som helhed.

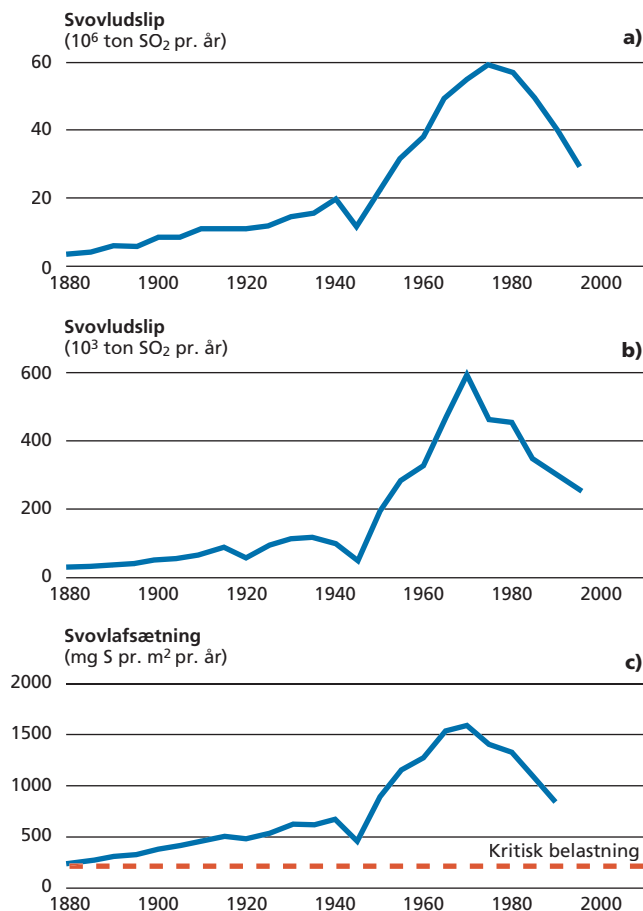
c) Den tilsvarende svovlaf-sætning i Sydsverige sammenlignet med 5 % kritisk belastning (dvs. 5 % af økosystemerne skades) (side 46).

Efter: S. Mylona, Tellus 48B, 662-689 (1993).

for de fleste andre lande, herunder Danmark (figur 4-10b), skete der ikke meget før 1. Verdenskrig. Det skal dog hertil bemærkes, at de officielt indberettede forureningsudslip ikke altid stemmer helt overens med (og ofte er mindre end) de udslip, som man af andre grunde formoder, der må være sket.

Globalt steg det menneskeskabte svovludslip (i det væsentlige i form af svovldioxid) fra under 2 millioner tons i 1860 til omkring 70 i 1980, før det igen begyndte at falde.

Ser man på et område i Sydsverige, hvor jorden er følsom over for forurening (figur 4-10c), viser det sig, at den kritiske belastning allerede så småt var overskredet i 1880. Det var netop dette område, som var på tale i forbindelse med Barsebäck-debatten for nogle år siden, hvor svenskerne bebrejdede os den forurening, som dansk brug af fossilt brændsel medførte.



Men den var altså ved at være gal allerede på et tidspunkt, hvor det danske udslip på grund af en relativt sen industrialisering var helt ubetydeligt.

For svovlforureningen er der, som det fremgår, opnået væsentlige reduktioner i udslip – på europæisk basis omkring en halvering siden 1970, mens det endnu går langsommere med andre forureninger.

Tungmetaller før og nu

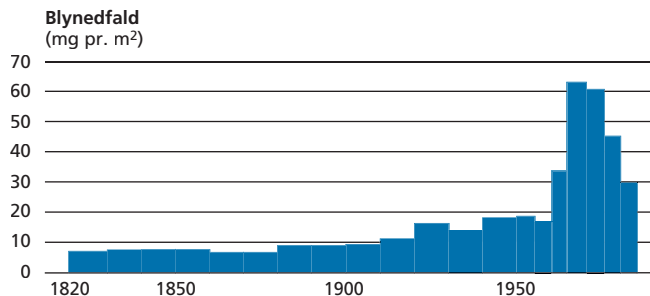
Forurening med tungmetaller er som tidligere nævnt startet indendørs allerede med anvendelse af ild til lys og varme i klippehuler. Fra industrielle anvendelser er forureningen imidlertid blevet langtransporteret.

Danske målinger i moser

Udviklingen i atmosfærens sammensætning måles i dag direkte mange steder på Jorden. Men hvis man vil vide, hvordan forholdene var for mere end blot 50 år siden, må man benytte andre metoder. I Danmark har Danmarks Geologiske Undersøgelse (nu GEUS) i 1978 og 1986 analyseret blynedfaldet på Dravad Mose i Sønderjylland med en metode baseret på den radioaktive blyisotop ^{210}Pb , der tillader en præcis datering ca. 200 år tilbage i tiden. Man kan på denne måde påvise både en stigning og et efterfølgende fald i bly stammende fra motorbenzin (figur 4-11).

Tungmetaller i indlandsisen

Oplysninger, der går endnu længere tilbage, kan man få fra borekerner fra indlandsisen på Grønland og i Antarktis, der populært sagt indeholder gammel luft. Og man har fx kunnet studere atmosfærens indhold af tungmetaller langt tilbage.



Figur 4-11

Udviklingen i blynedfald på Dravad Mose. Indtil omkring 1960 vokser forureningen langsomt på grund af stigende industrielle blyanvendelser. Derefter indtrådte en brat stigning, der tilskrives anvendelsen af blyadditiver i benzin til den voksende trafik. Senere faldt forureningen igen som følge af lovmæssige begrænsninger i benzins blyindhold.

Data fra O.S. Jacobsen, GEUS.

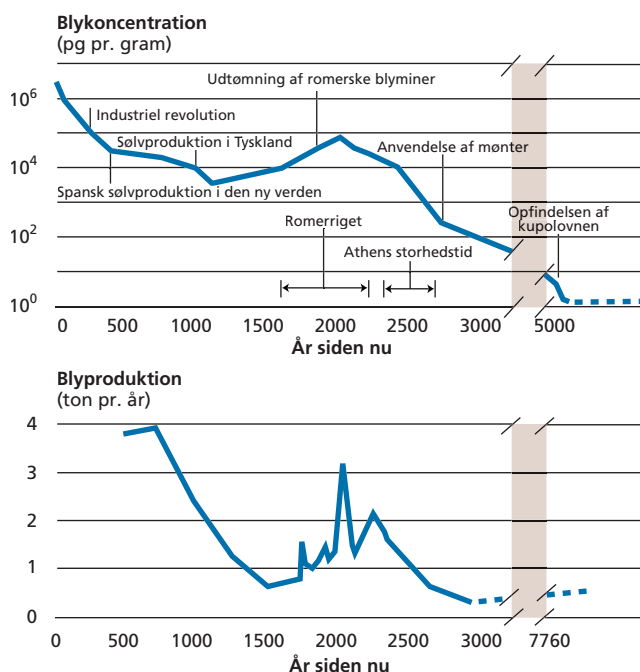
Omkring år 500 før vor tidsregning begyndte grækerne at udvinde bly og sølv på basis af blyulfid med et lille sølvindhold. For at udvinde sølvet smeltede man malmen i en luftstrøm, der oxiderede blyet, som så kunne skummes af. Det har vist sig, at allerede da begyndte koncentrationen af bly i atmosfæren at stige væsentligt over det naturlige niveau – og det toppede midlertidigt omkring år 0 samtidigt med blyproduktionen i det romerske imperium. I alt synes denne »klassiske« blyforurening at have udgjort omkring 15 % af det, der siden 1930 er blevet udsendt som følge af brugen af blyadditiver i benzin.

Hvordan der har set ud i lokalområder med udvindingsmetoder, der sendte 5 % af blyproduktionen lige ud i luften, og hvor blyet blandt andet blev brugt til vandrør og sødemidler, er et studium i sig selv. Nogle forskere har endda ovovet den påstand, at omfattende blyforgiftning kunne være en medvirkende årsag til Romerrigetets fald!

Kobber blev oprindeligt produceret fra frit metal, men fik først større betydning for ca. 5000 år siden, da man fandt ud af at udvinde det fra malm og sammensmeltede det med tin til bronze. Også kobber har kunnet påvises i grønlandsk is, hvor indholdet ligeledes begyndte at stige over det naturlige niveau

Figur 4-12
Den globale blyproduktion siden opfindelsen af de såkaldte kupolovne for 5000 år siden. Bemærk den logaritmiske skala. Da produktionen i de romerske miner var på sit højeste for 2000 år siden, var den lige så høj som ved begyndelsen af den industrielle revolution – ca. 80.000 tons om året. Nederst er vist blykoncentrationen i iskerner fra en boring på Grønland.

Efter: S. Hong et al. Science 265, 1841-43 (1994).



for 2500 år siden. Man kan derefter se en kraftig stigning, der falder sammen med den romerske anvendelse af kobber til militære og civile formål, efterfulgt af et fald ved Romerrigetssammenbrud.

Indtil 1200-tallet var kobberproduktionen i Europa lav, men man kan se et væsentligt bidrag fra Kina, hvor kobberproduktionen nåede et maksimum under Sung Dynastiet (960-1279). Ligesom for bly vedkommende skete der selvfølgelig en kraftig stigning ved industrialiseringen i forrige århundrede, men man kan igen ane, hvordan den lokale forurening omkring en primitiv industri må have været.

Ozon og anden fotokemisk luftforurening

»Den reneste og mest iltholdige Luft træffer man udenfor Byerne, på Landet, i Skovene og ved Havet. Man er her fri for alt det Støv, de mange forskellige ildelugtende og skadelige Tilblandinger, som er umulige at undgå i Byen. Men hvad der særligt betinger Luftens Godhed herude, er dog dens Indhold af Ozon«.

Sådan står der i en sundhedslære fra 1907, og det hedder senere bl.a.

»Den Anseelse, som Luften mellem Fyrretræer nyder, som særlig sund og styrkende, er velbegrundet og skyldes den rigelige Mængde Ozon, der findes her«.

Det er en anden tone end den, man nu kan høre i den offentlige debat hver sommer. Her får ozon skyld for en række problemer, i særdeleshed efter at svovlforureningen og forsuren ikke er så slem, som den har været.

Det begyndte i Californien

Denne nye type forurening blev først observeret som et problem i midten af 1940'erne i Los Angeles i Californien, hvor den medførte en brunfarvning af atmosfæren, en reduktion af sigtbarheden, skader på planter og for mennesker åndedræts-



Figur 4-13
Fremstillingen af denne kinesiske bronzehund har sat sig spor i den grønlandske indlandsis.

Foto: Werner Forman.

besvær og svien i øjnene. Det var dog først 5-10 år senere, at man forstod, at der var tale om såkaldte fotokemiske processer. Her reagerer kulbrinter og kvælstofoxider under påvirkning af sollys og danner bl.a. ozon.

En væsentlig kilde til de reagerende kulbrinter og kvælstofoxider er biltrafik, og det var derfor ikke noget tilfælde, at fænomenet først blev observeret i Los Angeles. En medvirkende årsag var dog, at byen har et varmt og solrigt klima, og at den ligger omgivet af bjerge, således at forurening har svært ved at blive spredt væk.

– og det fortsatte i Europa

Senere er denne »fotokemiske smog« – i daglig tale kaldet »ozonforurening« – blevet observeret i alle andre industrialiserede lande; i midten af halvfjerdserne i Norge og Sverige og derefter også i Danmark.

En af de længste serier af ozonmålinger i Europa stammer fra Rügen (figur 4-14a), hvor den årlige middelværdi voksede fra 15 ppb i 1956 til 24 ppb i 1983. Ældre målinger ved Paris 1876-1890 viser niveauer omkring 11 ppb. Man skal være varsom med resultater af gamle målinger, men meget tyder på, at de gennemsnitlige ozonniveauer i Europa er blevet fordoblet, siden man for snart hundrede år siden skrev om ozonens velsignelser. Det passer også sammen med den dramatiske stigning, der er sket i udslippet af kulbrinter og kvælstofoxider.

Senere målinger (bl.a. tyske, figur 4-14b) har vist yderligere stigninger frem mod midten af 1980'erne. Der rapporteres nu om svage stigninger og fald fra forskellige lande, men alt i alt synes der at være sket en stabilisering i de seneste år. Den længste tidsserie i Danmark (figur 4-14c) går kun omkring 20 år tilbage og viser ingen klar tendens.

Dette generelle billede er i rimelig overensstemmelse med, at de europæiske udslip af kvælstofoxider og kulbrinter vel er steget kraftigt siden forrige århundrede, men dog har ligget ret konstant i de sidste 20 år.

Hvor kommer ozonen fra?

Størstedelen af atmosfærens ozon (90 %) findes i stratosfæren (se side 19). Herfra blandes ozon langsomt ned til troposfæren, hvor den nedbrydes i forskellige reaktioner eller afsættes på overflader. Hvis der ikke skete andet, ville det give en ozonkoncentration ved jordoverfladen på omkring 10 ppb.

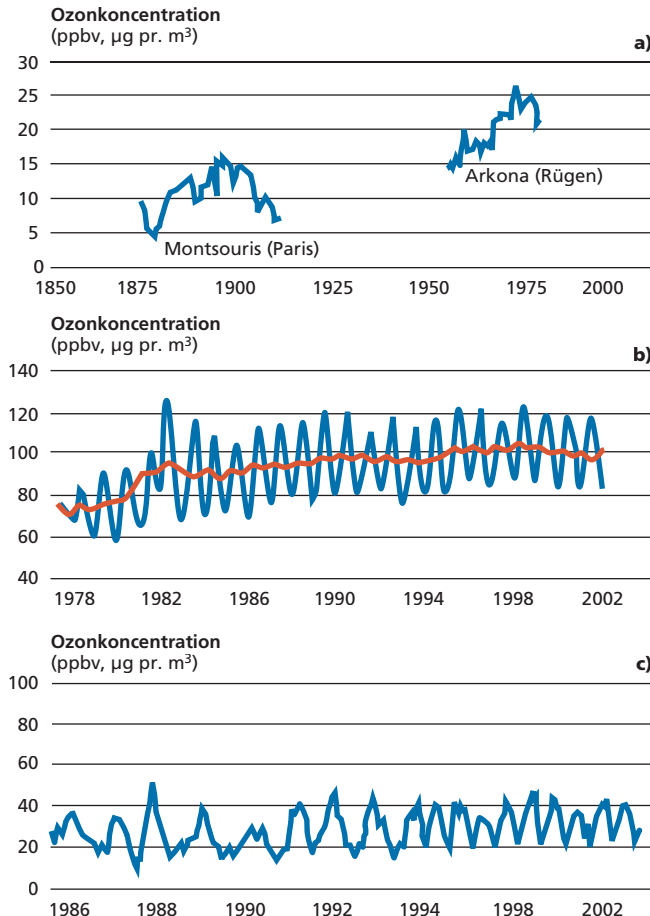
Undertiden kan der ske direkte ozongennembrud af tropopausen; det kan medføre koncentrationer på over 100 ppb og

dermed i sig selv give en overskridelse af gældende grænseværdier. Selv den »naturlige« natur er altså ikke helt ren!

Fotokemiske reaktioner

I praksis optræder imidlertid både meget lavere og meget højere koncentrationer. Det skyldes en række atmosfærekemiske processer mellem kvælstofoxider og kulbrinter under indflydelse af sollys (figur 4-16).

Den oprindelige »Los Angeles-smog« var et udpræget byfænomen, og som sådan kan den også genfindes i midt- og sydeuropæiske byer, hvor man finder væsentligt højere forureningsniveauer end i Skandinavien. Her, derimod, optræder de højeste niveauer på landet, mens der er relativt lave niveauer i byerne; paradoksalt nok netop på grund af biltrafikken! Det



Figur 4-14

a) Årlige middelværdier af ozonkoncentrationen målt ved Montsouris nær Paris (1876-1910) og ved Arkona på Rügen (1956-83). Man ser en stærk vækst i perioden efter 2. Verdenskrig; den synes at være i overensstemmelse med de tidligere, mere primitive målinger omkring år 1900.

Efter: A. Volz og D. Kley; Nature 332, 240-242 (1988).

b) Månedlige gennemsnit af ozonkoncentrationen målt på Zugspitze (2962 m) i Syd-Tyskland. Man kan se tydelige årstidsvariationer, men en udjævnet kurve (rød) viser, at langtidsvæksten nu stort set er gået i stå.

Efter: Jahresbericht 2002 aus dem Messnetz des Umweltbundesamtes.

c) Danske målinger af ozonkoncentration; indtil 1994 fra Viborg, derefter fra Keldsnor. Også her ser man en tydelig årstidsvariation, men ingen langtidstendens.

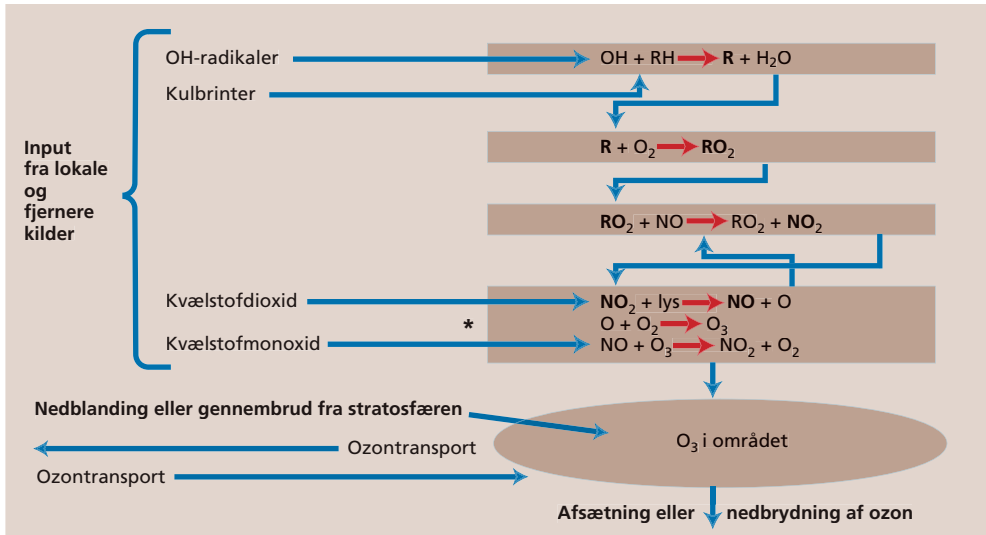
Data fra DMU.

1 ppbv er 1/1.000.000.000 målt som volumen. Det svarer til omkring 2 mikrogram per kubikmeter.



Figur 4.15
Smog i Los Angeles, Californien.

Foto: Scanpix.

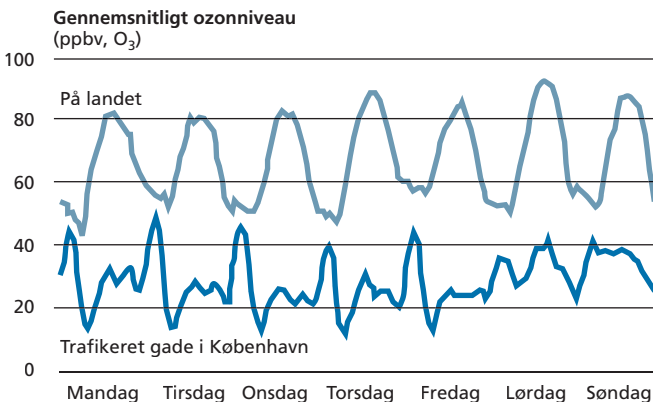


Figur 4-16

De oprindelige mængder af kvælstofmonoxid og kvælstofdioxid afhænger af, hvad der udsendes fra lokale forureningskilder. Ved høj forbrændingstemperatur som i eksplosionsmotorer findes det meste i form af NO – for benzinbiler over 90 %.

Stærkt forenklet starter dannelsen af ozon (O₃) i troposfæren, ved at sollys med en bølgelængde mindre end 400 nm spalter kvælstofdioxid (NO₂) i kvælstofmonoxid (NO) og iltatomer (O), markeret midt i skemaet (*). Iltatomerne reagerer med iltmolekyler og danner ozon, kvælstofmonoxiden reagerer med ozon og gendanner kvælstofdioxid. Herved ville der, hvis der ikke skete andet, opstå en ligevægts-situation, hvor koncentrationen af O₃ afhang af forholdet mellem NO₂ og NO.

Imidlertid er der flere reaktioner i atmosfæren, som ændrer forholdet mellem NO og NO₂. Afgørende er flygtige organiske kulbrinter, der kan omdannes til forbindelser, der reagerer med kvælstofmonoxid (NO) og danner kvælstofdioxid (NO₂). Og så er vejen åben for dannelse af mere ozon.



Figur 4-17

Gennemsnitligt ugeforløb af ozonniveauet i en trafikeret gade i København (nederste kurve) sammenlignet med forløbet ude på landet (øverste kurve). Man ser, at niveauet generelt er lavere i byen, men at gennemsnittet er højere i weekenden, hvor der er mindre trafik.

Efter: Hovedstadsregionens luftovervågningsenhed

skyldes, at størstedelen af den kvælstofoxid, der udsendes fra biler, er det relativt harmløse NO (kvælstofmonoxid), som først i atmosfæren reagerer med ozon og danner den sundhedsfarlige NO₂ (kvælstofdioxid). Samtidig bliver ozon omdannet til almindelig ilt. Man får på den måde ombyttet én forurening med en anden, der i øvrigt i flere henseender har de samme virkninger. Fænomenet bliver demonstreret hver weekend, når udslippet af kvælstofmonoxid i de store byers gader går ned, fordi der er mindre trafik, hvorefter niveauet af ozon går op (figur 4-17).

Andre fotokemiske produkter

Selv om ozon er det væsentligste, og i hvert fald det mest omtalte, stof i »fotokemisk smog« har også en række andre stoffer betydning. Sideløbende med ozon, eller ved reaktioner med ozon, kan der fx dannes stoffer som aldehyder og peroxyacetylnitrat (PAN), der virker øjenirriterende.

Desuden kan ozon reagere med kvælstofdioxid og danne nitratraddikaler (NO₃), der bl.a. kan blive til salpetersyre. Herved bliver fotokemisk luftforurening koblet til forsurening.

Langtransporteret ozon

Grænseoverskridende forurening blev først studeret i forbindelse med forsureningsfænomener som følge af forurening med svovl- og kvælstofforbindelser, men den optræder selvfølgelig også med ozon, der kan opblandes over store områder, før de nedbrydes kemisk eller afsættes fysisk. Størstedelen af den

Figur 4-18

Ozonforureningen omkring de viste byer er opgjort for forskellige kompasretninger. Som det ses optræder de største værdier i sydøstlig retning. Det siger noget om ozonens oprindelsesland.

Data: DMU



ozon, vi har i Danmark, skyldes langtransport af forurening og kun i mindre omfang lokal produktion af ozon.

Episoder med stærkt forhøjede ozonniveauer opstår under højtryk, hvor der er ringe lodret opblanding i atmosfæren, svage vinde og meget sol. Det sker typisk om sommeren i Centraleuropa, hvor der samtidig er stor emission. Hertil kommer, at høje temperaturer forøger afdampningen af organiske forbindelser fra vegetation – typisk granskove.

Om sommeren vil man derfor oftest se høje ozonniveauer, når vinden blæser fra Centraleuropa (figur 4-18). Om vinteren derimod vil den langtransporterede forurening med bl.a. kvælstofoxider nedbryde en del af ozonen, og vi får i så fald lave niveauer.

Da således både de primære og de sekundære forurenin-ger kan transporteres med vinden over lange afstande, er der sjældent nogen simpel sammenhæng mellem lokale udslip og lokale forureningsniveauer. Man kan ikke engang være sikker på, at en reduktion af udslippene vil føre til en reduktion i forureningsniveauerne.

Sundhed og velvære

Generelt viser en række undersøgelser, at der er en sammenhæng mellem ozonniveauet i udeluften og symptomer fra luftveje og lunger (irritation, hoste) samt hovedpine. Kritiske niveauer er ikke usædvanlige i central- og sydeuropæiske byer.

Selv om grænseværdierne lejlighedsvis overskrides i Danmark, er der ikke her tale om noget stort sundhedsproblem i sig selv. Ozon kan derimod indirekte have betydning ved at være bestemmende for dannelsen af kvælstofdioxid (figur 4-16), der i nogen udstrækning har samme virkning på luftvejene som ozon. Samtidigt kan de andre stoffer, der dannes ved fotokemisk aktivitet, fx aldehyder, være generende. I åbne områder og specielt ude på landet er ozonniveauerne derimod højere, og her sker hyppigt overskridelser af de niveauer, som anses for skadelige for vegetation.

Skader på afgrøder

Allerede under de første fotokemiske smog-episoder i Californien observerede man skader på vegetation, specielt vin. Disse effekter er nu observeret i Europa og også i Skandinavien. Umiddelbart kan det ses som misfarvede pletter af døde celler. Mere skjulte tegn kan bl.a. være nedsat fotosyntese, og de vil samlet medføre hurtigere nedvisnen og nedgang i biomassetilvæksten og dermed ringere udbytte (figur 4-21).

Figur 4-19
Astmapatienter og andre personer som lider af luftvejslidelser er særligt følsomme over for luftforurening.

Modelfoto: Britta Munter.





Figur 4-20
Korn er følsom over for ozonforurening.

Foto: Britta Munter.

Skønsmæssigt kan skader på afgrøder i Danmark forårsage et tab i udbytte på 10 %. Der er ikke foretaget egentlige beregninger af de økonomiske konsekvenser, men et groft skøn baseret på udenlandske, bl.a. svenske, vurderinger antyder dog, at der er tale om et tab i størrelsesordenen 1 milliard kroner om året.

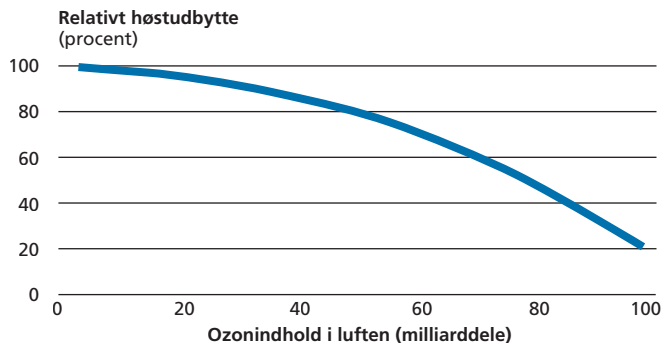
Man ved endnu ikke, hvor meget fotokemisk luftforurening betyder for planter i naturen, men som vist side 47 har ozon formentlig også spillet en rolle ved »skovdøden«.

Bekæmpelse

Når man ser bort fra kopimaskiner og andre små apparater, der kun har en helt lokal virkning, er der ingen direkte

Figur 4-21
Det relative høstudbytte af vårhvede, der er dyrket i »åben-top-kamre« ved forskellige ozonkoncentrationer i dagtimerne 9-16. Vinterhvede tager også skade, men er dog ikke så følsom.

Kilde: Effects of Air Pollution on Agricultural Crops in Europe. EU-kommisjonen 1993.





Figur 4-22
Luftforurening fra trafik er en væsentlig årsag til dannelse af ozon.

Foto: 2. maj, Sonja Iskov.

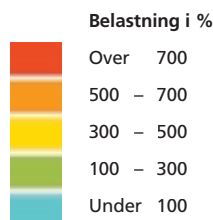
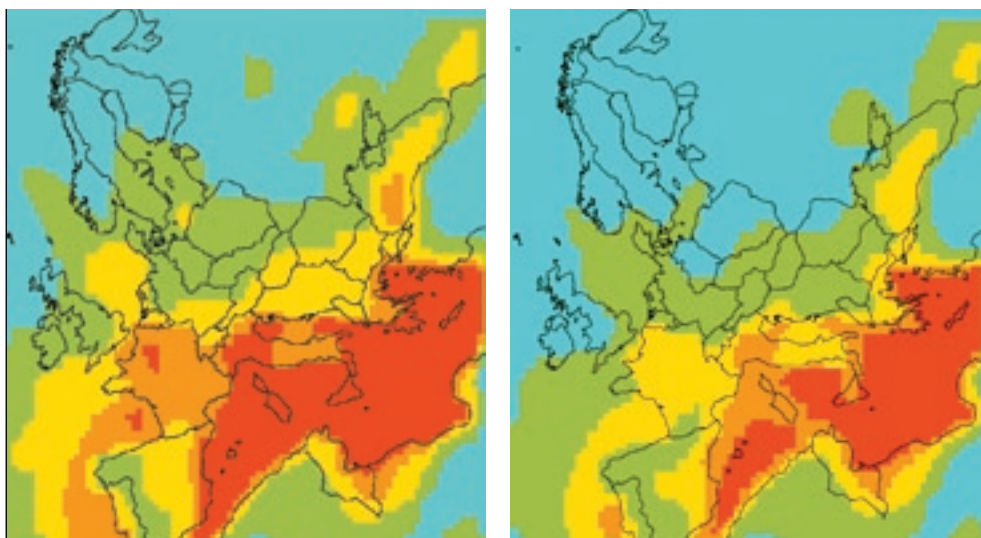
menneskeskabte kilder til ozon. Man kan derfor heller ikke opstille grænseværdier for udslip af ozon, sådan som man fx har grænser for, hvor meget svovl, der må være i fyringsolie, og hvor meget kulilte, der må komme ud af en bil.

Ozon er i alle praktiske henseender en sekundær forurening, der kun kan påvirkes ved ændringer i udslippet af de primære forureninger, i dette tilfælde kulbrinter og kvælstofoxider. Så skulle man selvfølgelig umiddelbart tro, at det bare gjaldt om at reducere dem, men helt så enkelt er det ikke.

Som nævnt kommer meget af den ozon, vi finder i Danmark om sommeren, hvor niveauerne er højest, fra Centraleuropa. Her vil man med held kunne forbedre den øjeblikkelige situation ved fx at indskrænke biltrafikken. Og det er dét, vi undertiden om sommeren læser om i avisen. Efterhånden kan noget af den dannede ozon blive transporteret med vinden op på vores breddegrader, og det kan vi – i den øjeblikkelige situation – desværre ikke selv gøre noget som helst ved.

I Danmark er der ingen grund til at forbyde biltrafik, bare fordi man ser høje ozonniveauer i byerne. Det kan nemlig, lige som i gamle dage, være et tegn på, at den lokale forurening med andre stoffer i det givne øjeblik er lav.

På længere sigt derimod gælder det selvfølgelig om at få reduceret de samlede udslip af kvælstofoxider og kulbrinter, og her tæller de danske udslip med i det store regnestykke. For før eller siden vil også vores forureninger bidrage til dan-



Figur 4-23
Modelberegninger af den kritiske belastning af afgrøder i Europa som følge af ozonforurening. Kortene viser belastningen i % i forhold til det kritiske niveau. Til venstre ses situationen med de udslip, der var i 1989. Til højre er vist situationen, som den ville have været i samme år, hvis både udslip af kvælstofoxider og kulbrinter havde været reduceret med 30 %. Forbedringen er synlig, men på ingen måde tilstrækkelig.

Efter: Z. Zlatev, J. Fenger, L. Mortensen. Computers Math. Applic. 32, 101-123, 1996.

nelsen af ozon i europæisk målestok; nedbrydningen er kun et rent lokalt fænomen.

Modelberegningerne (figur 4-23) antyder, at en sådan generel europæisk reduktion i udslippene af de primære forureninger skal være stor. Skal skader på vegetation forhindres i hele Europa, må man op på en reduktion på 95 %. Og det kan vel næppe anses for politisk muligt.

Danmark kan desværre ikke umiddelbart opnå noget ved at gå enegang. Tværtimod! I den hypotetiske situation, at alle danske forureningsudslip – og kun disse – blev stoppet, ville der ganske vist blive en smule mindre ozon i det samlede Europa, men der ville – vel overraskende for de fleste – komme omkring 1 % mere ozon i Danmark.

Der er derfor heller ingen egentlige grænseværdier for ozon, men kun niveauer, hvor befolkningen skal informeres eller direkte advares. Informationsniveauet ($180 \mu\text{g pr. m}^3$) nås et par gange om året i Danmark. Varslingsniveauet ($360 \mu\text{g pr. m}^3$) er aldrig nået.

Internationale aftaler

Forsuring og andre miljøskader som følge af luftforurening med svovl- og kvælstofforbindelser er et fænomen i europæisk skala. Derfor skal problemerne løses i et internationalt samarbejde. Det sker i De Forenede Nationers Kommission

for Europa, hvor man i 1979 fik etableret og underskrevet den såkaldte Geneve Konvention om langtrækkende, grænseoverskridende luftforurening. I forbindelse med konventionen er der udarbejdet protokoller som fastsætter mål for reduktion af udslip af luftforurening.

Den foreløbige krone på værket er den såkaldte Göteborg-protokol, der for første gang sætter et samlet loft over de nationale udslip i Europa. Når protokollen er fuldt implementeret i 2010 vil Europas udslip af SO₂ være reduceret med mindst 63 %, NO_x med 41 %, VOC med 40 % og ammoniak med 17 % – alt regnet i forhold til 1990.

Det vil betyde, at de arealer, der belastes med for høje forureningsniveauer i Europa, vil blive reduceret fra 93 millioner ha i 1990 til 15 millioner ha i 2010. Arealet med for høj eutrofiering vil være faldet fra 165 millioner ha til 108 millioner ha. Antallet af dage med for høje ozonniveauer vil blive halveret, og der vil være næsten 50.000 færre dødsfald som følge af ozon og partikler. Mængden af vegetation, der belastes med for høje ozonniveauer, vil være reduceret med 44 %.



Figur 4-24
Göteborgprotokollen giver for første gang et samlet loft for de europæiske udslip og deres effekter.



Hullet i himlen



Sideløbende med problemerne med ozon i lav højde begyndte ozon at optræde i en helt anden rolle, nemlig gennem nedbrydning af det ozonlag i stratosfæren, der beskytter mod for meget UV-stråling.

Foto: Highlight.

I midten af 1970'erne klagede passagerer og besætning på nogle af de nye højtgående fly, der bl.a. var sat ind på ruten mellem New York og Tokyo, over hovedpine og åndedrætsbesvær. Altså de samme gener, som man oplevede under fotokemiske smog-episoder. Og det var ikke så mærkeligt, for man var fløjet gennem det såkaldte ozonlag. Selv om alle større maskiner har trykkabine, er det udeluften, der bliver trykket sammen, og det er den, man indånder. Det var nu kun et teknisk problem, som ret let lod sig løse. Værre var det, at flyvningen måske kunne nedbryde ozonlaget.

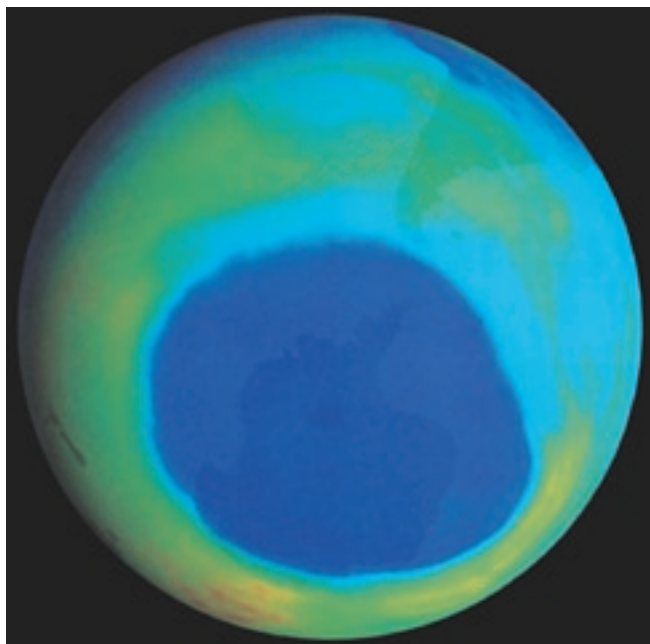
Eksistensen af et ozonlag i stratosfæren var blevet diskuteret allerede i begyndelsen af 1930'erne, men først med en stor målekampagne i det geofysiske år 1957 blev der foretaget grundigere udmålinger. Indtil begyndelsen af 1970'erne havde ingen dog tænkt sig muligheden af, at menneskelige aktiviteter kunne true ozonlaget.

De første målinger

Men i 1982 blev så de første tegn på ozonnedbrydning observeret. Overraskende nok skete det på Antarktis (figur 5-2), hvor et engelsk forskerhold målte den totale ozonsøjle med

Figur 5-1
Ozonhullet over den sydlige halvkugle i 2003. Det strækker sig helt op over sydspidsen af Sydamerika.

Foto: NASA.



et jordbaseret instrument (et såkaldt Dobson-spektrometer). I virkeligheden var »ozonhullet«, som det snart kom til at hedde, blevet registreret flere år tidligere af den amerikanske Nimbus 7-satellit, der blev opsendt i 1978. Men da ingen havde regnet med effekten, var alle satellitens ozonmålinger under en vis værdi automatisk blevet kasseret ved databehandlingen som fejlagtige.

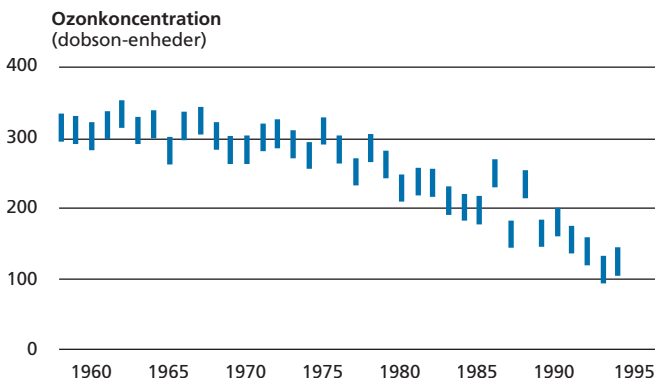
Freon som årsag

Fænomenet viste sig imidlertid at være anderledes, end man først havde forestillet sig. Hovedårsagen var ikke højtgående flyvemaskiner (som i øvrigt heller ikke havde fået den udbredelse, man havde ventet), men en mere jordbunden udsendelse af »freon« og beslægtede forbindelser.

Freon er fællesbetegnelsen for en række kunstigt fremstillede stoffer, chlorfluorcarboner (CFC). De er under normale omstændigheder overordentligt stabile og helt ugiftige. Derfor har de haft en lang række tekniske anvendelser (i køleskabe, spraydåser o.m.a.). Umiddelbart kunne de være en miljømæssig gevinst. Men det var netop deres store stabilitet, som skulle vise sig at volde problemer. Den betyder nemlig, at stofferne kan blive blandet op i hele Jordens atmosfære, og i begyndelsen af 1970'erne konstaterede man, at stort set al den CFC, der var sendt ud i atmosfæren, stadig var der.

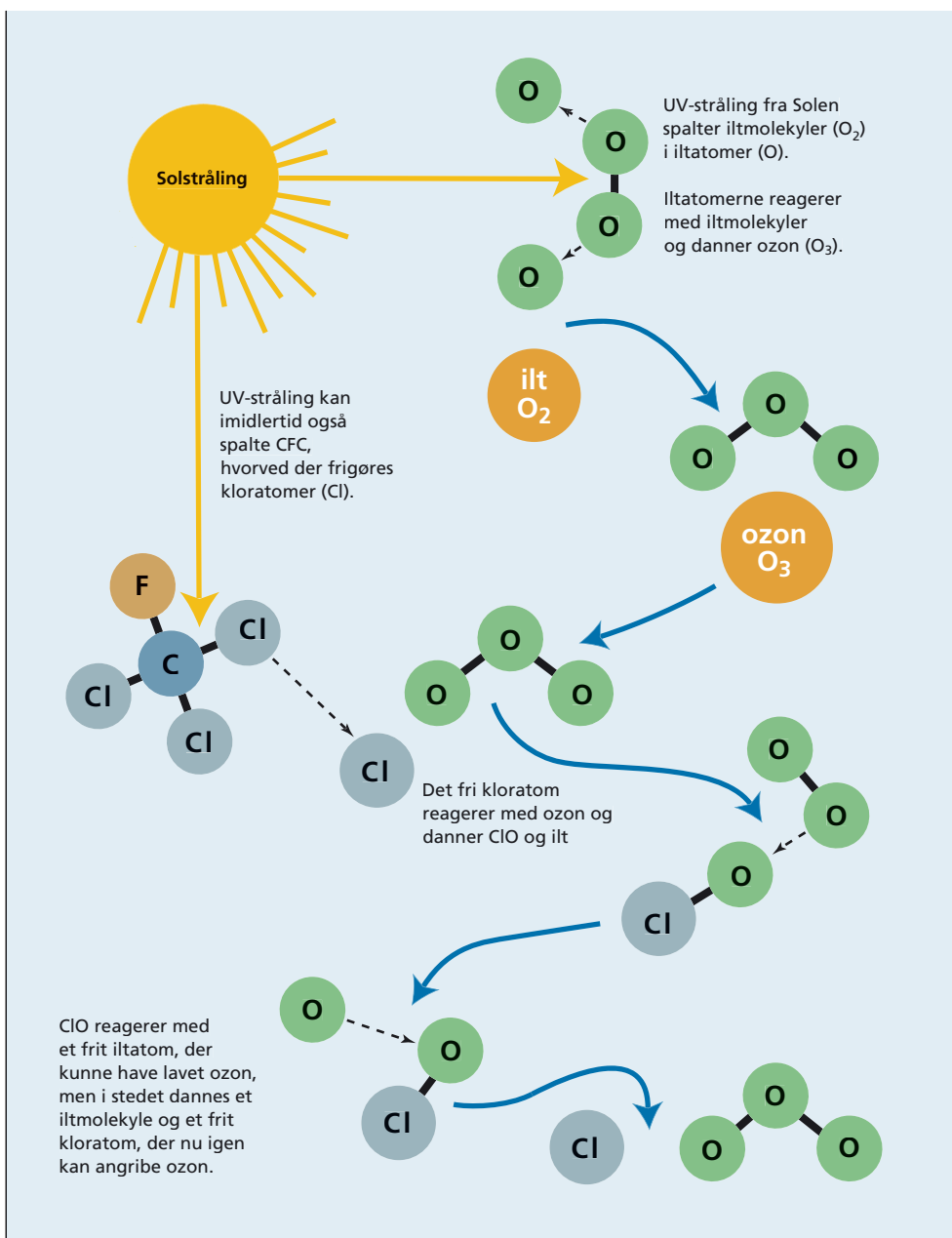
Nedbrydningsmekanismer

Når freonforbindelserne kommer op i ozonlaget, vil de imidlertid blive spaltet af den kraftige ultraviolette stråling, hvorved der frigøres kloratomer. Gennem kædereaktioner kan hvert af disse kloratomer nedbryde mange tusind ozonmolekyler (figur 5-3).



Figur 5-2
Total ozon målt over Halley Bay Station på Antarktis i oktober måned.

Efter: Centre for Atmospheric Science, Cambridge.



Figur 5-3

Dannelse af ozon i stratosfæren og efterfølgende nedbrydning som følge af CFC-forurening. Her vist for CFC-11.

Når fænomenet først blev observeret over Antarktis, hvor der ikke er nogen forureningskilder, skyldes det helt specielle meteorologiske forhold. Dels er der ekstremt lave temperaturer, hvor klorholdige forbindelser fryser ud på iskrystaller i skyer om vinteren (vores sommer) og frigøres på én gang om foråret; dels er der en stor hvirvelstrøm, »den polare vortex«, der holder sammen på det hele. Fænomenet er dog senere også blevet iagttaget på den nordlige halvkugle, hvor ozonlagets tykkelse er faldet ca. 5 % siden 1980.

Den gode og den onde ozon

En udtynding af ozonlaget vil, gennem en påvirkning af Jordens strålingsbalance, have flere virkninger. Det afgørende er, at der absorberes mindre af Solens UV-stråling i stor højde, og at der dermed når mere stråling ned til jordoverfladen. Det betyder, at der kan dannes mere ozon i lav højde, hvor den har en række skadelige virkninger (side 59). Vi får altså til en vis grad byttet den »gode« ozon ud med den »onde«.

Klimavirkninger

Også klimaet kan blive påvirket. Som beskrevet senere er både ozon og CFC drivhusgasser, der påvirker Jordens varmebalance. En reduktion af ozonmængden i stratosfæren – og dermed mindre energiabsorption – medfører afkøling, og det er beregnet, at udtyndingen af ozonlaget har modvirket 15-20 % af drivhusvirkningen fra andre gasser. På den anden side vil den forøgede dannelsen af ozon i lav højde forstærke drivhuseffekten.

Uanset hvad nettovirkningen er, bliver der lavet om på atmosfærens temperaturprofil. Billedligt talt kan man opfatte det, som om ozonlaget lægger »et låg på troposfæren« ved at danne en inversion, »tropopausen«, der forhindrer lodrette luftbevægelser. Derfor vil en udtynding af ozonlaget kunne medføre uforudsigelige ændringer i atmosfærens generelle cirkulation, og det vil formentlig betyde et mindre stabilt globalt klima.

Økologiske virkninger

Den ekstra UV-stråling, der når jordoverfladen, vil specielt bestå i den biologisk aktive, såkaldte UV-B-stråling med en bølgelængde mellem 290 og 320 nm. Hermed rammes en række planter, der har vist sig at reagere med reduceret bladareal og nedsat fotosyntese.

På forskellig vis synes planternes reaktion på forøget UV-stråling at være koblet til luftens stigende indhold af kuldioxid, men der er ikke nogen entydig sammenhæng. For nogen planter (fx ris og hvede) kan UV-strålingen ophæve kuldioxidens gødningseffekt. For andre planter vil stigende kuldioxid modvirke UV-skader.

Også planktonalger i havet er følsomme over for selv små doser af UV-B-stråling. De er tilpasset til at leve på en dybde, der afskærmer dem fra den kortbølgede stråling, men alligevel lader den stråling med længere bølgelængde, som skal bruges i fotosyntesen, passere. Ved forøget stråling vil de enten søge mod større dybder eller direkte blive skadet. Da de udgør det første led i havets fødekæde, vil det i alle tilfælde kunne få konsekvenser for de højere led – herunder fisk.

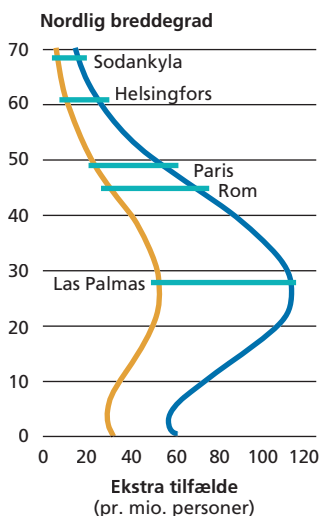
Det vil igen kunne få konsekvenser for klimaet. Havenes planktonalger optager nemlig store mængder kuldioxid, og enhver ændring i UV-strålingen vil derfor kunne påvirke det globale kulstofkredsløb (side 21) og dermed atmosfærens indhold af kuldioxid. Herved påvirkes Jordens varmebalance og følgelig det globale klima.

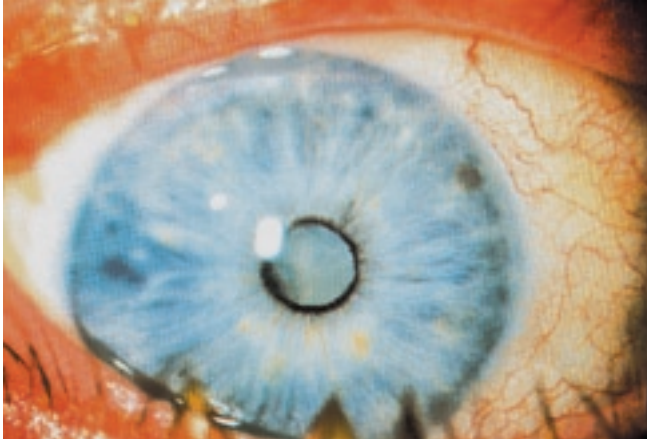
Sundhedsskader

Den største bekymring vækker imidlertid den forventede påvirkning af menneskelig sundhed. Under skyfri betingelser, hvor mange netop udsætter sig for solstråling, vil 1 % mindre ozon betyde 1,3 % mere UV-B-stråling.

Figur 5-4
Risikoen for hudkræft som følge af nedbrydningen af ozonlaget afhænger af breddegraden. Den gule kurve viser antallet af ekstra tilfælde af hudkræft pr. million personer svarende til situationen i 1992. Den blå kurve viser antallet ved en antaget fordobling af nedbrydningen, hvis folk ikke beskytter sig mod for meget solstråling.

Efter: Miljöns framtid i Finland, 1996.
Foto: Ole Malling.





Figur 5-5

Øje med grå stær, hvor linsen bliver uigennemsigtig. En mulig konsekvens af forøget UV-stråling.

Foto: H. Chr. Wulf.

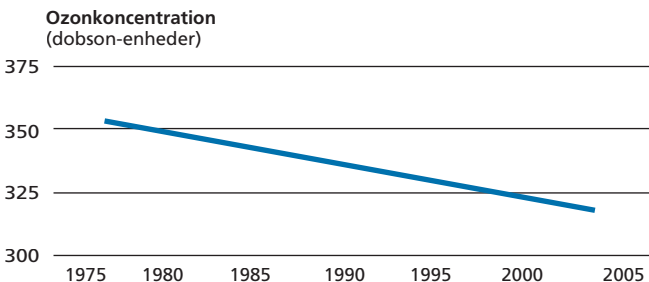
Specielt er DNA i hudceller følsomt over for UV-B-stråling og de kan udvikle hudkræft. Det er anslået, at 1 %'s reduktion i den totale ozonmængde vil medføre en 2 %'s stigning i antallet af hudkræfttilfælde. Betydningen for udvikling af modermærkekræft er mindre klar.

Ozonlaget over Danmark

I Danmark måles den totale ozonmængde løbende af Danmarks Meteorologiske Institut. Siden målingerne startede i 1979 er der konstateret et samlet fald på omkring 10 %. Det svarer nogenlunde til det europæiske gennemsnit.

Udslip og virkninger af CFC-gasser

CFC og lignende forbindelser har som nævnt haft udbredt industriel anvendelse som opblæsningsmidler i skumplast, kølemidler, drivmidler i spraydåser o.m.a. Selv om forbruget fases ud, vil en række tidligere anvendelser – fx til isolationsmaterialer – medføre, at der kan ske et udslip til atmosfæren længe efter, at det direkte forbrug er ophørt (figur 5-8).



Figur 5-6

Udviklingen i den totale ozonmængde over Danmark siden 1979. Ozonmængden er i middel faldet med omkring 0,4 % om året. Man har endnu ikke set nogen afdæmpning i faldet.

1 Dobson-enhed svarer til 0,01 mm ozon ved 1 atmosfæres tryk og 0° C.

Efter: Danmarks Meteorologiske Institut, 2003.

Figur 5-7

Eksempler på stoffer, der nedbryder ozonlaget. Tallet i navnet angiver den nøjere kemiske struktur. Bemærk, at stoffer, der indeholder brint, har kortere levetid og mindre ODP (se teksten).

Stof	Levetid i år	ODP
CFC-11	60	1
CFC-12	120	1
CFC-113	90	1,07
CCF-114	200	0,8
HCFC-22	15	0,05
HCFC-123	2	0,02

De forskellige CFC'er (og lignende forbindelser) er ikke lige effektive til at nedbryde ozon. Hvis man sætter CFC-11's evne til 1, får de andre forbindelser den værdi, der ses i figur 5-7. Man kalder nedbrydningssevnen for stoffets ozon-nedbrydningspotential (ODP).

I en bekæmpelsesstrategi forsøger man at reducere det samlede effektive CFC-udslip. Det kan bl.a. gøres ved at erstatte stoffer, der har højt ODP, med stoffer, der har et lavere. Typisk kan der være tale om stoffer med samme struktur, men med indhold af brint i stedet for klor. Herved bliver de mindre stabile og kan derfor omsættes i troposfæren, således at kun en mindre del når stratosfæren (figur 5-7).

Ved vurderingen af CFC'ernes miljøpåvirkning skal man desuden tage i betragtning, at de er meget effektive drivhusgasser.

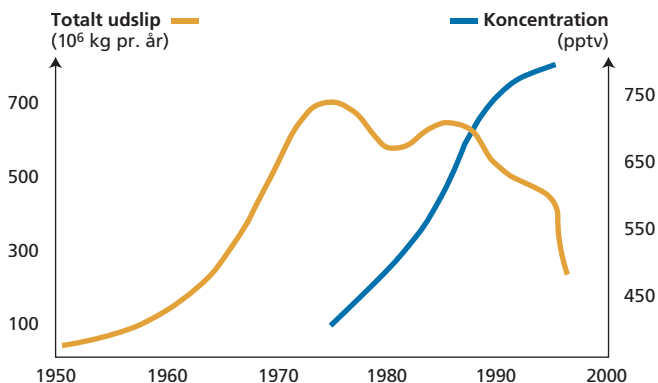
Den internationale indsats

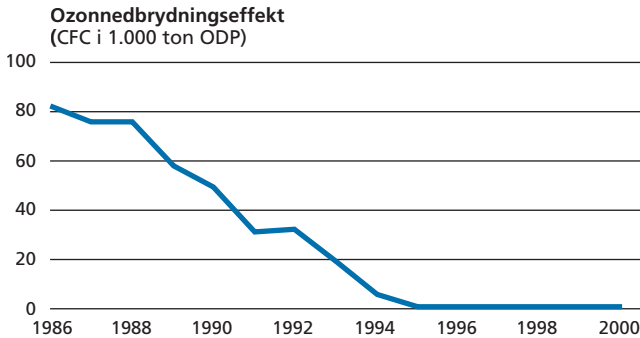
Efter at årsagen til ozonlagsudtyndingen var blevet fastslået, varede det ikke længe, før arbejdet med at udforme en international rammekonvention om beskyttelse af ozonlaget begyndte. Resultatet blev den såkaldte Wien-konvention, der blev undertegnet i 1985.

Figur 5-8

Det globale udslip af de to mest anvendte CFC'er CFC-11 og CFC-12 voksede fra et ubetydeligt niveau umiddelbart efter 2. Verdenskrig til mere end 700.000 tons i begyndelsen af halvfjerdserne. Selv om udslippet nu igen er faldet som følge af internationale aftaler, er koncentrationen i atmosfæren fortsat steget.

Kilde: WMO 1995.



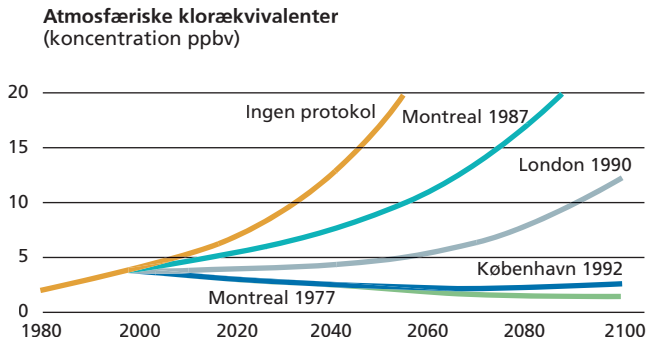


Figur 5-9

Forbruget af CFC'er i Danmark i % af forbruget i 1986.

Tallene er omregnet til CFC-11-ækvivalenter.

Efter: Miljøstyrelsen.



Figur 5-10

Atmosfærens koncentration af klorholdige forbindelser. Målt op til nu og beregnet for fremtiden under forudsætning af gennemførelsen af forskellige internationale aftaler om udfasning af CFC'er og andre ozonedbrydende stoffer. Bemærk, at man i bedste fald skal hen i anden halvdel af århundredet, før man kommer under niveauet før 1980.

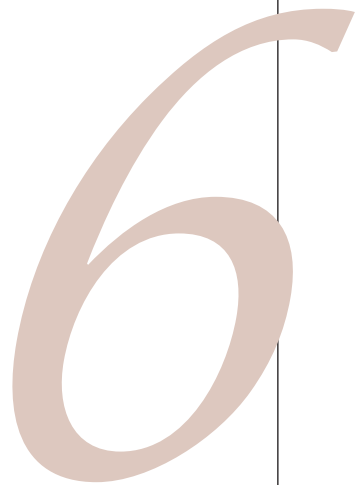
I 1987 blev den mere konkrete Montrealprotokol undertegnet. Her forpligtede parterne sig til at halvere forbruget af de 5 vigtigste CFC'er i forhold til 1986 inden 1998; samtidigt skulle forbruget af 3 haloner (lignende stoffer, der indeholder brom) stabiliseres inden 1992. U-lande kunne dog vente 10 år med at opfylde aftalerne. Ved senere møder i London (1990), København (1992) og Montreal (1997) er udslipsreguleringen blevet strammet og omfatter nu alle kendte, vigtige ozonlagnedbrydende stoffer.

I Europa er produktionen og forbruget af ozonedbrydende stoffer faldet drastisk de sidste 15 år (figur 5-9), og de politiske målsætninger er foreløbig opnået. Det er måske mere tvivlsomt om det – som planlagt – vil lykkes at udfase erstatningsstofferne inden år 2015.

Selv om alle målsætninger og aftaler opfyldes fuldt ud, vil situationen dog først være rimeligt normaliseret en gang i anden halvdel af århundredet (figur 5-10).



Varmedøden



Forøgelsen af drivhuseffekten har mange virkninger. Den stigende temperatur får havenes vandstand til at stige. For lavtliggende koraløer kan syndflodssituationen fra Dorés billedbibel godt gå hen og blive alvor.

Nedbrydningen af ozonlaget er et alvorligt, globalt problem, men det er allerede utvetydigt observeret, det er rimeligt vel forstået, og man ved, hvordan det skal løses. Et andet globalt miljøproblem: Forøgelsen af drivhuseffekten og den deraf følgende risiko for globale klimaændringer er både videnskabeligt og politisk set langt mere indviklet og kontroversielt.

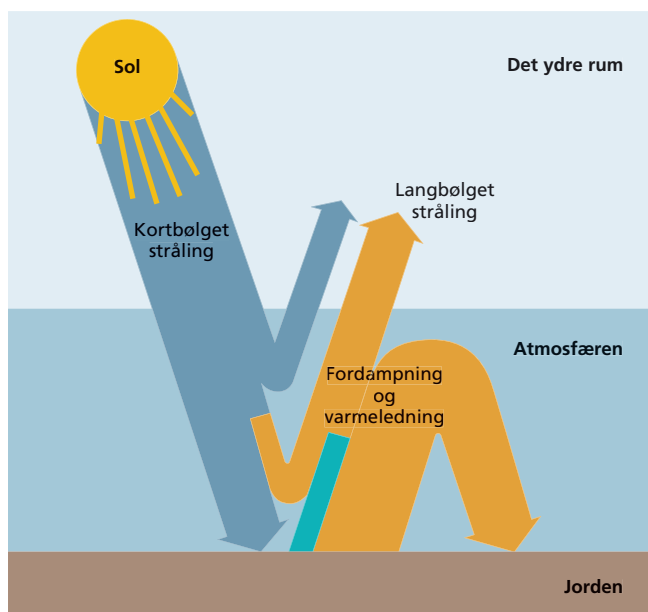
For det første hænger fremskrivningerne i høj grad på modelberegninger. For det andet vil de forventede virkninger ramme forskellige områder forskelligt med både vindere og tabere. Og endelig omfatter forsøg på en bekæmpelse globale indgreb i både energi- og fødevarereproduktion – en opgave der alvorligt vanskeliggøres af stigningen i verdensbefolkningen og udviklingslandenes krav om en forbedret materiel levestandard.

Drivhuseffekten

Den såkaldte drivhuseffekt (figur 6-1) består i, at atmosfæren populært sagt holder på den indstrålede solenergi. Det medfører, at Jordens middeltemperatur bliver et par og tredive grader højere, end den ellers ville have været. Drivhuseffekten er dermed en væsentlig forudsætning for, at der overhovedet

Figur 6-1

Kortbølget solstråling går relativt let gennem atmosfæren og opvarmer jordoverfladen. Varmeenergien skal stråles tilbage, men da jordoverfladen og atmosfæren har en langt lavere temperatur end Solen, sker det ved længere bølgelængder, som atmosfæren absorberer bedre. En del af energien sendes tilbage mod Jorden, som varmes op, indtil der opstår en ligevægt, hvor der stråles lige så meget energi ud i verdensrummet, som der kommer ind. Denne »drivhuseffekt« har således væsentlig betydning for klimaet på Jorden. Balancen kompliceres af fordampning og varmeledning af vand, skydannelse, luftbevægelser o.m.a.



kan være liv på Jorden i den form, vi kender det. Problemet er blot, at en række menneskelige aktiviteter ændrer atmosfærens indhold af nogle vigtige naturligt forekommende sporstoffer – først og fremmest kuldioxid, metan og lattergas. Herved forøges drivhuseffekten, hvorved Jordens varmebalance forskydes.

Det vil ikke alene kunne betyde en generel opvarmning, men også ændringer i nedbør og vindsystemer. Hertil kommer, at højere temperaturer vil medføre, at vandstanden i havene stiger – dels fordi vand udvider sig i varmen, dels fordi der sker en afsmeltning af gletsjere og indlandsis.

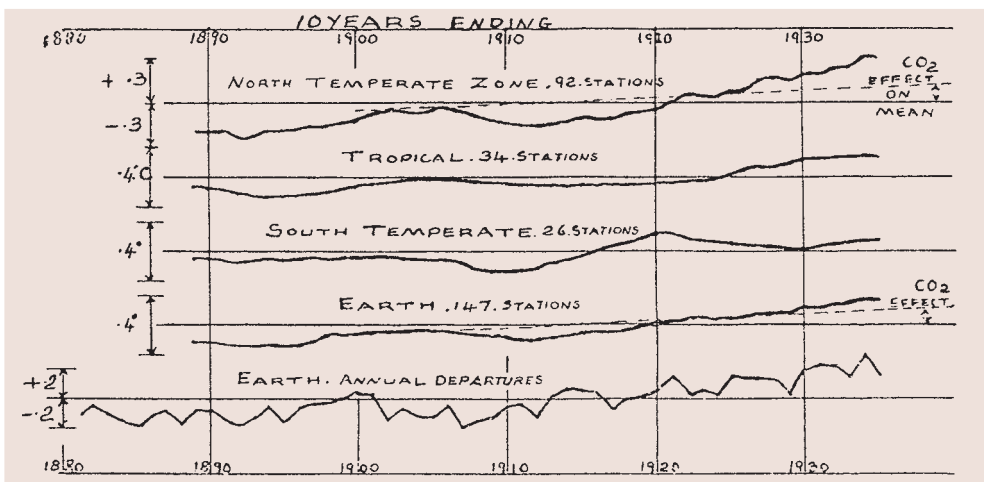
Tidlige undersøgelser

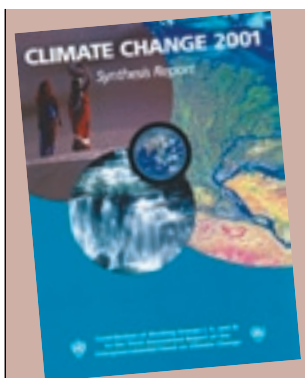
Allerede i midten af forrige århundrede var man klar over, at atmosfærens indhold af kuldioxid var afgørende for Jordens varmebalance. I 1896 vurderede svenskeren Arrhenius, at en fordobling af kuldioxid-koncentrationen ville medføre en global temperaturstigning på 5-6° C. Det var dog først i slutningen af 1930'erne, at egentlige beregninger af kuldioxidudslip blev sammenholdt med målinger af globale temperaturstigninger (figur 6-2).

De første undersøgelser blev mødt med nogen skepsis, og det blev hævdet, at den udsendte kuldioxid ville blive absorberet i havet. I øvrigt anså man nærmest en beskeden opvarmning for en fordel. Endelig tabte drivhuseffekten kampen om offentlig opmærksomhed til økonomiske kriser og optakten til 2. Verdenskrig.

Figur 6-2

Statistisk påvisning af en global temperaturstigning i slutningen af 1930'erne. Forfatteren, G. S. Callender, har anslået et bidrag fra fossilt brændsel, der ikke er helt forskelligt fra det, som man i dag beregner på verdens største computere.





Figur 6-3
IPCC's synteserapport om
klimaændringer fra 2001.

Da mere præcise målinger af luftens indhold af kuldioxid blev startet i slutningen af 1950'erne, blev det dog snart klart, at atmosfærens indhold af kuldioxid var stigende. Men det var først efter den internationale konference »Drivhuseffekten, klimaændringer og økosystemer« i 1985, at de skræmmende perspektiver for alvor begyndte at gå op for forskere og politikere. Afgørende her var det, at man ved hjælp af store computere var blevet i stand til at beregne de mulige klimaændringer mere overbevisende.

Det internationale samarbejde

Delvis affødt af Brundtlandrapporten om bæredygtig udvikling, der blev udgivet i 1987, oprettedes Det Mellemsstatslige Klimapanel (IPPC). Dette panel sammenstiller og vurderer den videnskabelige litteratur om klimaændringer, om deres virkninger og samfundsøkonomiske aspekter, samt om mulighederne for en tilpasning til eller modvirkning af klimaændringer (figur 6-3).

Ved FN's konference om miljø og udvikling i Brasilien i 1992 underskrev 154 lande en rammekonvention om klimaændringer, der sigter mod at stabilisere atmosfærens indhold af drivhusgasser på et niveau, der forhindrer farlige menneskabte klimaændringer. Denne konvention er senere fulgt op af internationale forhandlinger om udslipsreduktioner.

Drivhusgasserne

De vigtigste drivhusgasser er vanddamp og kuldioxid, men også metan, lattergas og ozon har betydning. Hertil kommer CFC og lignende stoffer med ren menneskelig oprindelse (figur 6-4).

Relative opvarmningspotentialer

På samme måde, som man har defineret et ODP for ozonnedbrydende stoffer, har man defineret begrebet »globalt opvarmningspotentiale« (på engelsk Global Warming Potential – GWP). GWP udtrykker et givent stofs virkning over en årrække, fx 100 år, i forhold til kuldioxids virkning.

Regnet efter vægt og over en 100-årig periode er metan ca. 21 og lattergas ca. 310 gange så effektive drivhusgasser som kuldioxid. CFC'er kan umiddelbart være flere tusind gange så effektive, men deres virkning formindskes dog af, at en nedbrydning af ozonlaget modvirker drivhuseffekten.

Kuldioxid

De menneskeskabte udslip udgør kun få procent af transporterne i det globale kulstofkredsløb (side 21), men på grund af kuldioxids lange omsætningstid vil det tage århundreder for atmosfæren at indstille sig på en ny ligevægt. Foreløbig er atmosfærens indhold af kuldioxid steget godt 30 % siden industrialiseringen tog fart i 1800-tallet.

Metan

Atmosfærens koncentration af metan er mere end fordoblet i løbet af de sidste par hundrede år. Emissionerne er i dag fordelt med 20-40 % fra naturlige kilder (bl.a. vådområder), 20 % fra afbrænding af fossilt brændsel og 40-60 % fra andre menneskeskabte kilder, herunder forgæring i våde rismarker og i drøvtyggers fordøjelsessystem.

CFC'er og lignende forbindelser

Efter 2. Verdenskrig har atmosfæren indeholdt stigende mængder af industrielt fremstillede halocarboner, som foruden at nedbryde ozonlaget er effektive drivhusgasser.

Lattergas

Naturlige kilder til lattergas er vegetation i oceanerne og nedbrydning af organisk materiale, mens menneskeskabte kilder primært er forbrænding ved lave temperaturer, afbrænding af biomasse samt landbrugets brug af kvælstofgødning. Atmosfærens indhold af lattergas er i samme periode steget 14 %.

Partikler

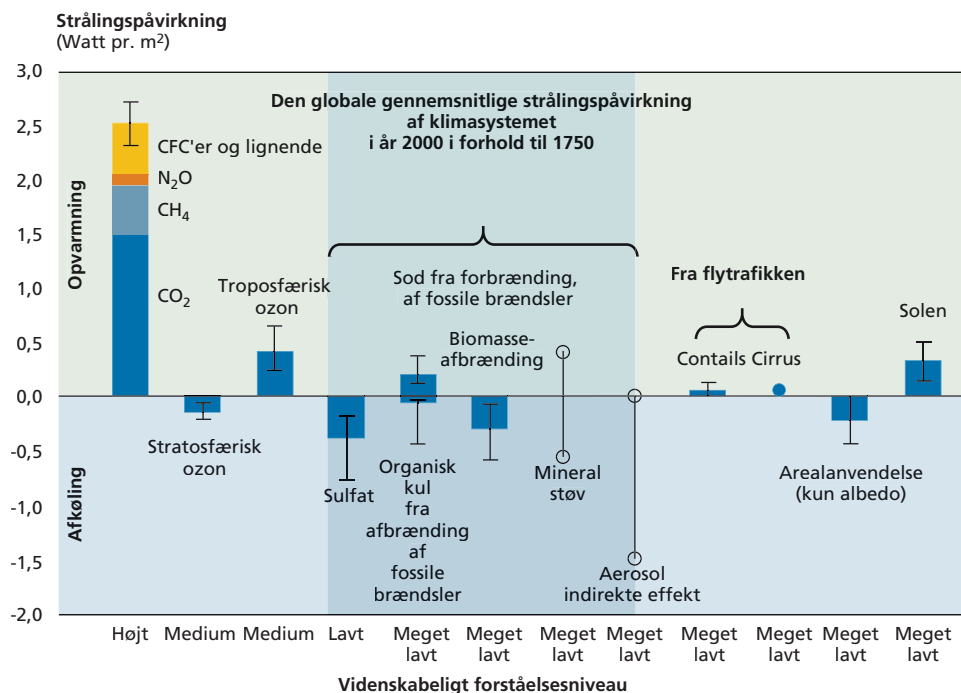
En stærkt diskuteret virkning af sulfatpartikler, der skyldes svovlforurening, er svært at vurdere, men den har indtil nu antagelig delvis modvirket den forøgede drivhuseffekt. Med en begrænsning af svovludslippet (der af andre grunde er ønskværdig) vil virkningen aftage.

Ozon

Ozon er en drivhusgas, som både findes i stratosfærens ozonlag og – som fotokemisk luftforurening – i troposfæren. Koncentrationerne af ozon i stratosfæren er faldet siden 1970'erne. Den fotokemiske luftforurening er derimod, i industrialiserede områder, omtrent fordoblet siden forrige århundrede.

Figur 6-4

De forskellige drivhusgasser og deres udvikling i atmosfæren.



Figur 6-5

Anslåede bidrag til den observerede klimaændring. Søjlerne viser den ekstra stråling, som jordoverfladen udsættes for.

Bidragene fra mineralstøv og aerosol er stærkt varierende. Den tynde streg ved dem angiver det interval, de varierer inden for.

Efter: IPCC 2001

Den relative betydning af stoffer og aktiviteter

Af den menneskeskabte påvirkning af Jordens varmebalance siden midten af forrige århundrede tilskrives godt halvdelen kuldioxid og knap en femtedel metan. Den resterende fordeling er noget usikker, fordi der er en række modvirkende effekter. Hertil kommer, at naturlige fænomener som vulkanudbrud og ændringer i Solens udstråling gør en vurdering vanskelig (figur 6-5).

Fordelingen på aktiviteter er ikke entydig, fx fordi fødevarereproduktion kræver energi og medfører ændringer i arealudnyttelse (herunder skovrydninger), men meget groft taget, og globalt set, er energisektoren ansvarlig for over halvdelen af påvirkningen og landbrugsproduktionen for en fjerdedel. Resten er sammensat af bidrag fra industri, ændret arealanvendelse m.m.

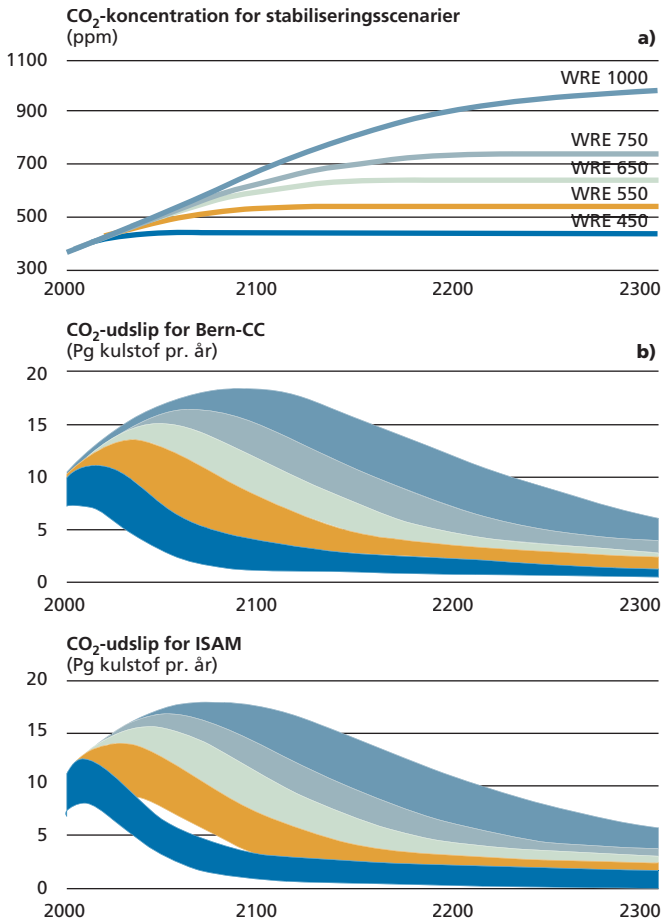
Fremtidsscenerier for drivhusgasser

Ud fra forskellige forudsætninger om befolkningstilvækst, økonomisk vækst, energieffektivitet og tilgængelighed af

energikilder har IPCC opstillet en række scenarier for fremtidige udslip af drivhusgasser og aerosoldannende stoffer. De er opdelt i fire grupper efter om udviklingen forventes at være miljø- eller vækst-orienteret, og om den satser på lokale eller globale løsninger. I alt er der 40 forskellige scenarier. Selv om de mest optimistiske af dem medfører et fald i CO₂-udslippet, giver de alle en stigning i koncentrationen – fra under 500 til over 1000 ppm.

Stabiliserings-scenarier

Man har også regnet baglæns (figur 6-6) og forudsat forskellige koncentrationsforløb, hvorefter man har bestemt, hvilke udslipsforløb de svarer til. En stabilisering på 550 ppm (WRE



Figur 6-6

- a) Forløb, der fører til stabilisering af atmosfærens indhold af kuldioxid på forskellige niveauer i løbet af de næste 300 år.
- b) Beregnede globale udslip med to forskellige modeller af kuldioxidudslip svarende til koncentrationsforløbene vist ovenfor. Det ses, at selv om man vil acceptere en stigning i koncentrationen til tre gange de nuværende, vil det på længere sigt kræve, at udslippene halveres.

Efter: IPCC 2001

550, omkring det dobbelte af det, man havde før industrialiseringen) vil kunne opnås omkring år 2150, hvis udslippene bremses op i løbet af de næste 50 år og derefter inden 2100 reduceres til en fjerdedel af det, vi har i dag – og derefter fortsat reduceres.

Det skal understreges, at disse beregninger ikke fra IPCC's side udtrykker nogen politisk målsætning. Det er heller ikke diskuteret, hvordan man teknisk skal kunne realisere de beregnede udslipsreduktioner. Der er kun tale om en demonstration af problemets omfang.

I Danmark har Energistyrelsen beregnet, at hvis der skal stabiliseres på 450 ppm, og alle Jordens indbyggere skal have samme udslip, skal de danske udslip pr. indbygger reduceres til $1/10$ i år 2100!

Fremtidens klima

Allerede for hundrede år siden var man klar over størrelsesordenen af den virkning, atmosfærens sammensætning har på Jordens varmebalance og dermed dens klima. Men detaljerede undersøgelser blev først mulige med fremkomsten af store computere.

Med komplicerede matematiske modeller, der minder om dem, man anvender til vejrforudsigelser, kan man beskrive klimaets udvikling i fremtiden. Resultaterne er af flere grunde usikre:

- Udgangspunktet er scenarier, som ikke beskriver, hvordan verden vil udvikle sig, men hvordan den muligvis kan udvikle sig.
- Klimasystemerne er endnu ikke fuldt forstået.
- Beskrivelsen af de mange faktorer, der spiller ind, må nødvendigvis være stærkt forenklet, bl.a. arbejder man med en grov geografisk opdeling.

Modellerne er under stadig udvikling, og man bygger nu den ene effekt ind efter den anden: vekselvirkninger mellem atmosfæren og oceanerne, betydningen af skydække osv. I takt med denne udbygning har der været en tendens til, at forudsigelserne er blevet mindre foruroligende. I begyndelsen af firserne talte man stadig om, at en fordobling af kuldioxidindholdet i atmosfæren ville give en temperaturstigning på 5° C frem mod 2100. Efter IPCC's seneste udmelding er 3° C mere rimeligt (figur 6-8).



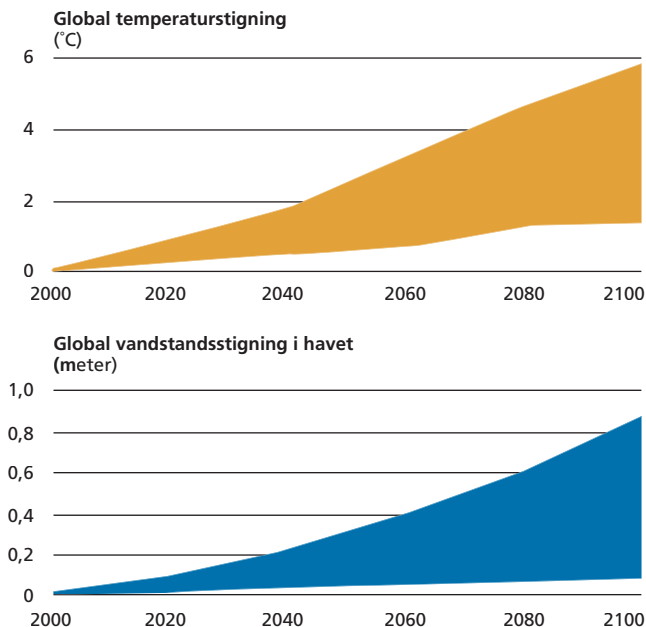
Figur 6-7
Store computere er en forudsætning for detaljerede klimaberegninger.

Foto: Britta Munter

Ligesådan er det gået med vandstandsstigningerne i havet. De første populære artikler, der viste landkort over Europa, hvis al Jordens is smeltede og vandet steg ca. 70 m, tog man måske ikke helt alvorligt, men i begyndelsen af firserne snakkede man seriøst om 4-5 m engang i næste århundrede. I 1990 var man nede på 66 cm i år 2100, og nu er et centralt skøn 50 cm (figur 6-8). En af årsagerne til de reducerede vurderinger er, at højere temperaturer giver mere vand i luften og derfor mere nedbør over polerne – specielt Antarktis.

Det er dog væsentligt at pointere, at disse beregnede globale ændringer ikke viser et slutresultat, men kun hvor man kan være nået til om 100 år. Udviklingen vil gå videre, men usikkerheden på scenarier og modelberegninger bliver efterhånden så store, at man let ender i rent gætteværk.

Samtidig har det imidlertid vist sig, at der er fænomener, modellerne vanskeligere kan gøre rede for. Undersøgelser af bl.a. indlandsis fra Grønland har således afsløret naturlige klimasving i fortiden på flere °C over mindre end 10 år. De hænger formentligt sammen med ændringer i globale havstrømme, men man ved ikke præcist, hvad der udløser dem, og således heller ikke i hvilket omfang vores nuværende ændringer af atmosfærens sammensætning udgør en risiko.



Figur 6-6

Temperaturstigningen vil afhænge af, hvordan verden udvikler sig. I forskellige scenarier antager man fx en verdensbefolkning, der varierer mellem ca. 7 og 15 milliarder i år 2100. Men ingen scenarier viser, at temperaturstigninger helt kan undgås. Det farvede område viser spændet i scenarier. Når den globale temperatur stiger, vil det betyde, at vandstanden i havene stiger. Det har to årsager: Der vil ske en afsmeltning af is fra gletsjere, og vandet vil udvide sig som følge af opvarmningen. I et middelscenario vil den gennemsnitlige vandstand være omkring en halv meter højere i slutningen af næste århundrede.

Efter: IPCC, 2001.

Når vi i Nordeuropa har et klima, der er varmere end på tilsvarende breddegrader i Nordamerika, skyldes det en udløber af den såkaldte »Golfstrøm«, der er en del af et globalt system af havstrømme. Normalt løber varmt overfladevand mod nord gennem Atlanten og bliver mere og mere salt. Herved bliver det tungere, synker til bunds og strømmer nu tilbage som koldt bundvand. Herved opvarmes den nordlige del af Atlanten.

Ændringer i dette forløb kan være en del af forklaringen på naturlige klimaændringer. En afsmeltning af Grønlands indlandsis kunne måske udløse en ændring af strømningssystemet. I så fald kunne der blive koldere i Danmark, selv om der bliver varmere i verden som sådan. I sin yderste konsekvens kunne man forestille sig, at der blev udløst en ny istid.

Foreløbig er der dog ikke meget, der tyder på mere end en svækkelse af strømmen. Det kan betyde, at opvarmningen over Nordeuropa måske bliver mindre end den ellers ville være blevet.



Figur 6-9
Afsmeltning af Grønlands indlandsis vil få vandstanden til at stige, men vil også kunne påvirke de globale havstrømme.

Foto: Merete Binderup.

Har vi allerede set klimaændringer?

Det er indiskutabelt, at Jordens middeltemperatur i dag er godt en halv grad højere, end den var før industrialiseringen tog fart i 1800-tallet; spørgsmålet er bare hvorfor? For der er mange effekter, der trækker i hver sin retning, og Jorden har tidligere oplevet hurtige, kun delvist forståede, klimaskift.

Den globale vandstand er også steget de seneste 100 år, dels på grund af vandets varmeudvidelse, dels på grund af afsmeltning af gletschere og iskapper. På basis af vandstands-målinger vurderer IPCC (2001), at vandstanden er steget mellem 10 og 25 cm. Det relativt store usikkerhedsinterval skyldes, at målingerne også indeholder ændringer på grund af jordkorpens lodrette bevægelser, der skal filtreres væk fra målingerne.

Fra anden side hævdes det, at de observerede temperaturændringer har en »naturlig« forklaring. Fx at de skyldes variationer i Solens magnetfelt, der påvirker Jordens skydække.

Men strengt taget er det væsentlige i denne forbindelse ikke, om vi allerede har påvirket klimaet ud over de naturlige variationer, men om der er overensstemmelse mellem observationer og modelberegninger. Kun i så fald kan man nemlig tro på beskrivelserne af fremtidens klima. Derfor er det nødvendigt at tage alle mulige effekter i betragtning. Der er dog bedst overensstemmelse mellem beregnede og observerede temperaturer, når man tager både naturlige og menneskeskabte påvirkninger i betragtning.

Livet i en varmere verden

Virkningerne af eventuelle klimaændringer er vanskelige at vurdere, fordi forskellige områder kan blive ramt vidt forskelligt, og fordi klimamodellerne kun delvist kan levere den nødvendige geografiske og tidsmæssige opløsning. Generelt slutter IPCC (2001) dog, at

»ændringer i drivhusgasser og aerosoler samlet må formodes at ændre regionale og globale klimarelaterede parametre som temperatur, nedbør, jordfugtighed og vandstand i havene. Potentielt alvorlige ændringer er identificeret, omfattende en vækst i nogle områder i hyppigheden af hedeølger, oversvømmelser og tørke, med resulterende virkninger for skovbrande, epidemier og sammensætningen af økosystemer, deres struktur og funktion – herunder den primære produktion«.

Klimaændringer og vegetation

Groft forenklet svarer den beregnede temperaturstigning til, at Jordens temperaturmønster flytter nogle hundrede km mod polerne – og i bjergegne et tilsvarende antal 100 m i højden. Det afgørende for, hvilken plantevækst der vil være fremherskende i et givet område, er imidlertid ikke temperaturen alene, men et samspil mellem temperatur og fugtighed, der bl.a. bestemmer jordfugtigheden.

Mange steder på Jorden kan en kombination af højere temperatur og mindre nedbør få alvorlige konsekvenser for både naturlige økosystemer og landbrugsproduktion. Det kan fx blive tilfældet i Middelhavsområdet og i de indre kontinenter, hvor store områder kan blive ude af stand til at brødføde befolkningen. Det kan igen resultere i politisk ustabilitet, folkevandringer og i sin yderste konsekvens krige.

Ligesom klimastudier baseres effektstudier i vidt omfang på modelberegninger. De fleste viser, at hvis der ikke sker ændringer i klimaudsvingene, kan man i Europa – som gennemsnit – modvirke produktionstab i landbruget ved tilpasning i form af andre afgrøder, kunstvanding mv. Det øgede CO₂-indhold i atmosfæren kan give større planteproduktion i de nordlige dele. Samtidig kan der dog komme problemer med forøget anvendelse af gødning og pesticider. Isoleret set kan der blive tale om økonomiske fordele, hvis tilpasningen sker tidligt. I Sydeuropa fås antagelig et tilbageslag.



Figur 6-10

En kombination af høje temperaturer og mindre nedbør kan blive et problem i Middelhavsområdet.

Foto: FotoDisc.



Figur 6-11
Så kaldte "røde rødgraner",
der vanskeligt har kunnet
tåle milde vintre. De bør
udskiftes med bl.a. bøg.

Foto J. Bo Larsen

En tidlig tilpasning er selvfølgelig endnu vigtigere i skovbrug, hvor de træer, der plantes nu, skal kunne trives i det klima, der vil herske om 100 år. Fx bør man i Danmark omstille de store rødgranplantager i Jylland til blandingsskov med mere løvtræ.

Overladt til sig selv synes træarter kun at kunne udbrede sig op til 200 km pr. århundrede. Hele skovtyper bl.a. i det nordlige Skandinavien kan forsvinde. Samtidig vil nye økoystemer kunne etableres.

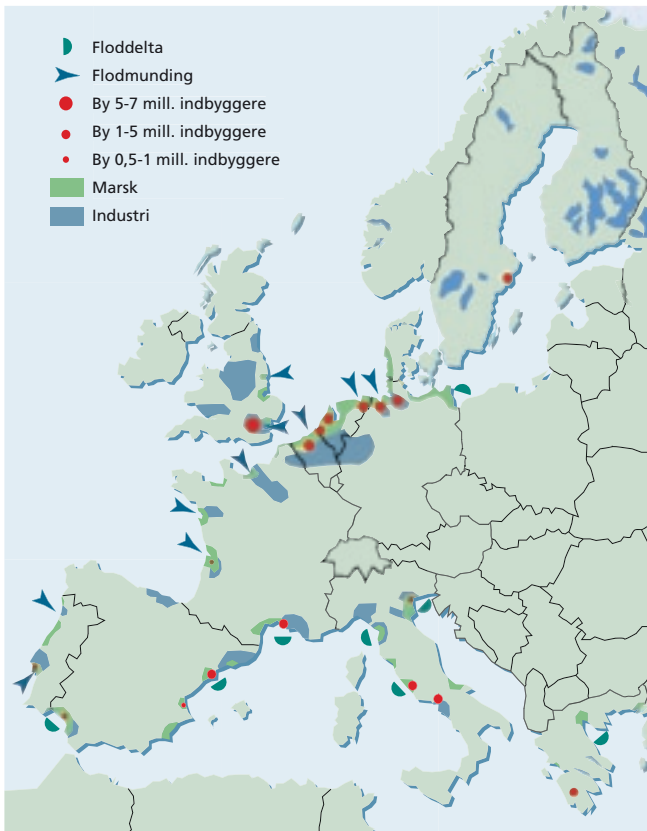
Foruden de umiddelbare virkninger vil klimaændringer kunne have indirekte effekter – fx gennem ændringer i nedbørsmønstret, der kan forøge risikoen for forsurening – eller ved en påvirkning af den fotokemiske aktivitet, der forøger ozonniveauet.

Stigningen i havenes vandstand

Betydningen af en given vandstandsstigning er lettere at vurdere; her ligger den største usikkerhed i, hvor meget vandet vil stige.

For lande som fx Schweiz betyder vandstandsstigningen selvfølgelig ikke noget. Men heller ikke for industrialiserede kystlande som Holland vil den beregnede halve meter være et uløseligt problem – kun en økonomisk belastning fordi de allerede eksisterende diger skal udbygges. Det samme gælder en forøget kysterosion, som også vil ramme Danmark. Det er dog et spørgsmål, hvorvidt man vil beskytte mod den stigende vandstand eller lade kysten udvikle sig naturligt.

De alvorlige problemer vil opstå i udviklingslandenes store floddeltaer og på små lavtliggende koraløer. Maldiverne, en øgruppe sydvest for Indien, hvor 200.000 mennesker bor på et samlet areal som Langeland, er direkte truet med udslettelse.



Figur 6-12
Europæiske kystområder, der er truet af en vandstandsstigning og indtrængning af saltvand i grundvandet. I Danmark er kun marskområder i Sønderjylland angivet, men der kan opstå forøget kysterosion mange andre steder.

Efter: Wieringa, 1995

Økonomiske vurderinger

Til trods for alle disse mulige ulykker, har nogle vurderinger tilsyneladende vist, at de umiddelbare omkostninger ved de beregnede klimaændringer, i form af skader eller behov for tilpasning, globalt set – og på kort sigt – vil koste mindre end forsøg på at begrænse udslippet af drivhusgasser.

Hertil skal så siges, at der er tale om gennemsnitsbetragtninger – enkelte områder kan blive meget hårdt ramt. Og man har slet ikke prissat belastningen af følsomme økosystemer. Indledende tiltag vil altid være dyre, og drivhusproblemerne må ikke tages ud af en endnu større sammenhæng. Menneskeskabte klimaændringer er kun én af mange miljøbelastninger, der er knyttet til anvendelsen af fossile brændsler, og forsøg på at begrænse klimaændringer vil give gevinst på mange områder.

Når vi det?

Brundtlandrapporten og Danmark

Brundtlandkommissionens rapport »Vor fælles fremtid« fra 1987 erkendte konflikten mellem på den ene side vækst i befolkningstal og materiel levestandard og på den anden side beskyttelsen af miljø og ressourcer. Men den så dog vækst som en nødvendig forudsætning for kampen mod fattigdom og miljønedbrydning. Den globale vækst skal imidlertid være »bæredygtig«, og rapporten konkluderede, at de industrialiserede lande inden for de næste 40 år (dvs. inden omkring 2030) skulle halvere energiforbruget pr. indbygger for at give plads for et merforbrug i udviklingslandene på 25 % pr. indbygger.

Som en direkte følge af »Brundtlandrapporten« blev der i oktober 1988 fremsat forslag til folketingsbeslutning om en halvering af Danmarks energiforbrug. Med Kyotoprotokollen og de efterfølgende forhandlinger i Europa har Danmark forpligtet sig til at reducere det effektive udslip af drivhusgasser i 2008-2012 til en værdi, der er 21 % lavere end 1990-værdien.

Reduktionen behøver dog ikke ske i selve landet. Man kan købe reduktionstilladelser i lande (fx østlande), der ikke selv kan udnytte deres tilladelser. Man kan også fx bygge mere effektive kraftværker eller plante skov i udviklingslande. Meget tyder på, at Danmark i vidt udfang vil udnytte sådanne muligheder.

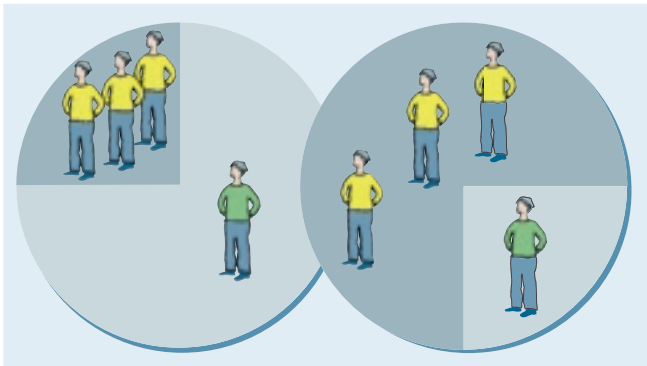
Den globale situation

Gennem internationale forhandlinger inden for rammerne af den såkaldte klimakonvention fra 1992 forsøger man at nå til enighed om lignende (om end ikke ensartede) reduktioner i den industrialiserede verden. Det kan i princippet også lade sig gøre, for med den forventede teknologiske udvikling kan vi leve uden materielle ofre med halvdelen af det energiforbrug pr. indbygger, vi har nu. Og vi kan også på forskellig vis lave energien uden så meget forurening. Hvis vi så yderligere sørger for ikke at blive flere, har vi gjort en rimelig indsats i overensstemmelse med Brundtlandrapportens anbefalinger. Men det er ikke nok!

Industrilande og udviklingslande

Det basale problem er forholdet mellem industri- og udviklingslande. Det kan opstilles på mange – mere eller mindre manipulerende – måder, men der er ingen tvivl om, at indtil nu har industrilandene haft hovedskylden for udslippene. Det har fået nogen til at hævde, at industrilandene allerede nu skyldte udviklingslandene en »forureningsret«, som de så kunne købe tilbage via passende økonomisk støtte.

I en tidligere meget omtalt bog fra 1991: »Drivhuseffekten i en ulige verden – et eksempel på miljøkolonialisme« spurgte de to indiske forskere Argawal og Narain bl.a. »Kan vi virkelig ligestille kuldioxidbidragene fra benzinslugende biler i Europa og Nordamerika, eller for den sags skyld, ethvert sted i den tredje verden, med metanudslippet fra fattige bønders trækokser og rismarker i Vestbengalen eller Thailand?« Det er en følelsessag, men drivhuseffekten har ingen følelser, og alle udslip tæller med.



Figur 6-13

»Den globale energilagkage«. Meget forenklet bruger $\frac{1}{4}$ af verdens befolkning $\frac{3}{4}$ af den globale energi. Hvis vi uden videre skulle dele lige, måtte vi i den industrialiserede verden ned på $\frac{1}{3}$ af det, vi bruger nu.

Og udviklingslandene skal bruge mere energi. Med et meget håndfast regnestykke bruger $\frac{1}{4}$ af verdens befolkning i industrilandene $\frac{3}{4}$ af verdens energi. Så skulle vi dele energien lige over nu, måtte industrilandene helt ned på $\frac{1}{5}$ af det nuværende forbrug pr. indbygger.

Hertil kommer, at Jordens befolkning ikke er konstant, men i øjeblikket vokser med ca. 3 mennesker i sekundet. Man kan selvfølgelig i princippet stoppe denne vækst på 9 måneder. Men der er en så stor træghed i systemet pga. personlige følelser, sociale relationer og religiøse holdninger, at væksten formentlig først flader ud hen mod år 2100, og befolkningen vil da være måske omkring 10 milliarder. En verdensomspændende krig eller epidemi kan selvfølgelig ændre situationen, men det er jo ikke attraktive alternativer.

Derfor vil udviklingen blive bestemt i udviklingslandene. Vi kan, og skal, påvirke den gennem økonomisk og teknologisk bistand, men holdningen i udviklingslandene – og i en række østlande for den sags skyld også – er tilsyneladende som Brecht siger:

»Erst das Fressen und dann die Moral«

eller i moderne form:

»Først udvikling og levestandard, så klimabeskyttelse og den slags«

Der er ikke meget, der tyder på, at det kan klares hurtigt med vindmøller, solceller, brintenergi og anden ikke-fossil teknik. Indiens og Kinas udbygning af kulkraft er et klart tegn på det modsatte.

Bekæmpelse eller tilpasning?

I princippet kan man forholde sig til de beregnede klimaændringer på to måder:

- Ved reduktion af udslip af drivhusgasser, i særdeleshed kuldioxid. Det betyder energibesparelser og fremstilling af energi med metoder, der ikke giver udslip af kuldioxid – fx solenergi.
- Ved tilpasning til ændringerne – fx i form af ændring af afgrøder, så de passer bedre til det nye klima, eller kystbeskyttelse af udsatte lavlandsområder.

I praksis vil man blive nødt til begge dele, for selv de mest optimistiske scenarier forudsiger visse klimaændringer. Det står også i klimakonventionen fra 1992 (Brasilien), hvis formål er udtrykt som

» ... en stabilisering af drivhusgaskoncentrationerne på et niveau, som vil forhindre en farlig menneskelig påvirkning af klimasystemet. Sådant et niveau skal opnås inden for en tidshorisont, der er tilstrækkelig til at: (i) tillade økosystemer at tilpasse sig naturligt til klimaændringerne; (ii) sikre at fødevareproduktionen ikke trues; og (iii) muliggøre en bæredygtig økonomisk udvikling«.

Præcist hvad der er farligt, er delvist et politisk spørgsmål, men teknisk og videnskabeligt har det været foreslået, at en temperaturstigning på 0,1° C og en vandstandsstigning på 2 cm pr. tiår må være acceptable. Sammenholder man dette med de beregnede klimaændringer i IPCC's scenarier (side 83) ses det, at vi – uden en ekstraordinær indsats – risikerer det dobbelte.

Hertil kommer, at disse tal jo udtrykker middelværdier – både hvad angår klimaændringerne og følsomheden over for dem. Og man kan som bekendt godt drukne i en sø, der er en halv meter dyb – i gennemsnit!



Det hele hænger sammen



Menneskeheden overbelaster Jorden – ingen tvivl om det. Vi er for grådige, vi er for sjukskede og vi er frem for alt for mange. Det medfører en række miljøbelastninger, som alle er mere eller mindre sammenkoblede.

Foto: Scanpix/Age.

Vores forurening af luften har stået på siden civilisationens begyndelse, men den har i tidens løb skiftet både karakter og format. Oprindeligt forsøgte man sig med simpel spredning af forureningen, men på længere sigt betød det blot, at problemerne blev flyttet fra indendørs, over lokal til regional skala. Den moderne teknologi, der er langt renere og mere effektiv end tidligere tiders, kan i mange henseender give os en mulighed for et pusterum, men dens omfang har nu rykket os op i ny, global skala. Samtidig har koblingen mellem det øjeblikkelige, lokale forureningsudslip og de ubehagelige virkninger fortonet sig – både geografisk og tidsmæssigt.

Væksten har ikke været jævn, og man kan se spor af kulturers opståen og sammenbrud – fx i forureningen med tungmetaller fra Romerriget og svovl fra østlandene. Men hverken dette eller verdenskrige og energikriser har stoppet den fortsatte vækst.

Flere af de stoffer, som i dag giver problemer, har tidligere været anset for helt harmløse; typiske eksempler er drivhusgasserne. Nogle er endda tidligere blevet anset for at være direkte miljøvenlige. Det gælder specielt CFC-gasserne, hvis store kemiske stabilitet har gjort dem velegnede til en række tekniske formål. Men netop denne stabilitet skulle vise sig at være afgørende for deres fatale bivirkning: nedbrydningen af ozonlaget.

Et andet, kontroversielt eksempel er tilsætningen af bly til benzin. Formålet var at give mulighed for motorer med højere kompression og dermed større effektivitet. Da man igen fjernede blyet fra benzinen, risikerede man at forøge udslippet af kræftfremkaldende organiske forbindelser.

Det centrale og overordnede problem er dog uden diskussion anvendelsen af fossile brændsler til fremstilling af energi. På længere sigt er løsningen andre og renere produktionsformer kombineret med en mere effektiv energiudnyttelse. Den kan bare ikke realiseres ganske uden videre, for fossile brændsler dækker i øjeblikket omkring $\frac{3}{4}$ af det globale energiforbrug. Og de miljøproblemer, der er forbundet med produktionen og forbruget af energien, har koblinger på alle led og kanter. Lad os blot nævne nogle af de vigtigste:

Udslippet

Her vil forskellige former for rensning, afsvovlingsanlæg på kraftværker, katalysatorer på biler osv. kunne løse mange problemer, men det vil normalt betyde et energitab og dermed et større udslip af kuldioxid. En anvendelse af biobrændsler

Figur 7-1

Fjernelse af bly i motorbenzin var ikke uden problemer.

Foto: Finn Palmgren.





er i princippet (om end i praksis ikke helt) kuldioxidneutral, men vil i stordrift kræve, at landbrugsproduktionen forøges. Hermed forøges dannelsen af lattergas og udvaskningen af kvælstof.

Atmosfæren

Her vil de forskellige stoffer vekselvirke og forstærke eller modvirke hinanden:

- Svovlforurening er en væsentlig årsag til forsuring, men giver også dannelse af sulfatpartikler, der modvirker drivhuseffekten.
- Dannelsen af sulfatpartikler skyldes bl.a. troposfærisk ozon, som igen skyldes kvælstofoxider og kulbrinter. Men de meteorologiske forhold spiller en stor rolle. Derfor vil klimaændringer påvirke dannelsen af ozon, som samtidig er en drivhusgas og derfor vil virke tilbage på klimaet.
- CFC-forbindelser nedbryder ozonlaget og er samtidig drivhusgasser, men en nedbrydning af ozonlaget svækker drivhuseffekten, så nettovirkningen på klimaet bliver lille.
- På den anden side vil en nedbrydning af ozonlaget betyde mere UV-stråling på jordoverfladen, hvilket foruden andre ubehagelige effekter vil betyde dannelse af mere ozon i lav højde, og mere drivhuseffekt.

Osv., osv.

Figur 7-2

Kraftværker er kilde til mange forskellige forurenende stoffer. Udslippene kan i de fleste tilfælde begrænses, men det er ikke umiddelbart muligt med kuldioxid.

Foto: Highlight.

Effekterne

Her kan de forskellige virkninger af luftforurening være svære at adskille:

- Ændringer i klima og forøget UV-stråling kan nedsætte modstandsevnen over for forsurening og fotokemisk luftforurening.
- På den anden side har reduktion af svovlforurening visse steder resulteret i, at nogle afgrøder lider af svovlmangel.
- En forøgelse af atmosfærens indhold af kuldioxid vil have en positiv virkning på planternes fotosyntese og vil dermed i første omgang binde kuldioxid og altså bremse drivhuseffekten. På længere sigt kan der ske en forskydning af næringsstofbalancen i jorden, således at vegetationen svækkes.
- Nedbrydning af ozonlaget vil give mere UV-stråling og kan dermed bl.a. svække planktonalgernes produktion i havet. Foruden den direkte økologiske effekt, vil det betyde, at der bindes mindre kulstof, og dermed kommer mere drivhuseffekt.

Politik og videnskab

Det er indviklet, men det er måske netop dét, der antyder en morale: Vi har på den ene side et politisk behov for handling efter nogle enkle, letfattede målsætninger: Bilerne ud af København, 20 % mindre CO₂-udslip i år 2010 og den slags. Og på den anden side en voksende videnskabelig erkendelse af, at problemerne hænger uløseligt sammen, og at naturen derfor

ikke altid reagerer, som man umiddelbart forestiller sig. Vi skal bare ikke bilde os ind, at vi, rimelig bekvemt, kan leve 6 milliarder mennesker på denne Jord – og om hundrede år måske 10 milliarder – helt uden at det giver skrammer i miljøet.

At diskutere økonomi i forbindelse med miljøbeskyttelse blev i mange år betragtet som at bande i kirken. Sådan er det ikke helt mere, for det er efterhånden blevet pinlig klart, at man ikke får noget gratis. Men det gælder om at få anvendt ressourcerne så effektivt og skånsomt som muligt.

Et skridt i den rigtige retning er Genevekonventionens seneste protokol om forsuring, eutrofiering og fotokemisk luftforurening. Her vil man, på basis af naturvidenskabelige resultater og økonomiske beregninger, forsøge at give de politiske beslutningstagere et grundlag for tilrettelæggelsen af den billigste og mest effektive bekæmpelsesstrategi – om end foreløbig kun på europæisk plan.



Litteratur til videre læsning

- Agarwal, A., Narain 1991.
Drivhuseffekten i en ulige verden – et eksempel på miljøkolonialisme. Mellempøkeligt Samvirke, København. 68 s.
- Aniansson, B. (red.) 1982.
Förurning idag och i morgen. Jordbruksdepartementet, Stockholm. 231 s.
- Bernes, C. 1993 (redaktør).
Nordens miljø – tilstand og trusler. Nordisk Ministerråd, København. Nord 1993:10. 212 s.
- Bettmann, O.L. 1974. The good old days – they were terrible. Random House, New York. 209 s.
- Brimblecombe, P. 1987.
The Big Smoke. A history of air pollution in London since medieval times. Routledge, London. 185 s.
- Bruce, J.P. 1990.
The atmosphere of the living planet Earth. WMO-No.735. World Meteorological Organization, Geneve. 42 s.
- Cowling, E.B. 1982.
Acid precipitation in historical perspective. Environ. Sci. Technol. Vol.16, 110A-123A.
- Fenger, J., Tjell, J.C. (red.) 1994.
Luftforurening. Polyteknisk Forlag, Lyngby, 479 s.
- Fenger, J. 1995.
Ozon som luftforurening. Tema-rapport fra DMU 1995/3. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde. 48 s.
- Fenger, J. 2003.
Renere luft – den danske indsats. Miljøstyrelsen, København. 32 s.
- Graedel, T.A., Crutzen, P.J. 1995.
Atmosphere, Climate, and Change. Scientific American Library, New York. 196 s.
- Gribbin, J. 1988. Hullet i himlen.
Menneskets trussel mod ozonlaget. Munksgaard, København. 231 s.

Hyldtoft, O. 1996.

Teknologiske forandringer i dansk industri 1870-1896. Odense Universitetsforlag, Odense. 413 s.

Jensen, B. 1996.

Miljøproblemer og velfærd. Spektrum, København. 221 s.

Jensen, P.K.A. 1996.

Menneskets oprindelse og udvikling. G.E.C.Gad, København. 349 s.

Jørgensen, A.M.K., Halsnæs, K. Fenger, J., 2002.

Drivhuseffekt og klimaændringer. Den globale opvarmning – bekæmpelse og tilpasning. Gads Forlag, København. 181 s.

Kemp, K., Palmgren, F. 1994.

Luftforurening i danske byer. Tema-rapport fra DMU 1994/2. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde, 40 s. (DMU udsender løbende årsrapporter om det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram).

Kjærgaard, T. 1991.

Den danske Revolution 1500-1800. En økohistorisk tolkning. Gyldendal, København. 441 s.

Kowalok, M.E. 1993.

Research Lessons from Acid Rain, Ozone Depletion, And Global Warming – Common Threads. Environment vol.35.6, 13-20, 35-38.

Lovelock, J. 1992. Jordens overlevelse.

Politikens Forlag, København. 192 s.

Meadows, D., Meadows, D.L., Randers, J. 1993.

Hinsides grænser for vækst. Gyldendal, København. 288 s.

Mylona, S. 1993.

Trends of sulphur dioxide emissions, air concentrations and depositions of sulphur in Europe since 1880. EMEP/MS.C.W Report 2/93. Norsk Meteorologisk Institut, Oslo. 35 s. med bilag. (Senere offentliggjort i Tellus (1996), 48B, 662-689).

Neuberger, H. 1970.

Climate in art. Weather s.46-56.

Nriagu, J.O. 1983.

Lead and lead poisoning in antiquity. Wiley, New York. 437 s.

- Nriagu, J.O. 1990.
The rise and fall of leaded gasoline. *The Science of the Total Environment*, 92, 13-28.
- Ponting, C. 1991.
En grøn verdenshistorie. Schönberg, København. 424 s.
- Strandberg, M., Mortensen, L. 1996.
Naturens tålegrænser for luftforurening. TEMA-rapport fra DMU. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde. 37 s.
- UNEP, WHO 1992.
Urban Air Pollution in Megacities of the World. Blackwell, Oxford, 230 s.
- Weart, S.R. 1997.
The discovery of the risk of global warming. *Physics Today*. Jan. 1997. 34-40.
- Wieringa, K. (red.) 1995.
Environment in the European Union 1995. Det europæiske Miljøagentur, København. 151 s.

Stikordsregister

A

Aldehyder · 58
Ammoniak · 45, 49
Argon · 18
Atmosfære
 opbygning · 19
 sammensætning af · 18

B

Benzen · 36
Bihulebetændelse, tegn på
 luftforurening · 26
Bikarbonat · 45
Bilpark, globale · 38
Biltrafik · 36, 54
Bly
 i indlandsisen · 51, 52
 nedfald i Danmark · 51
 udslipsreduktion · 36
Blyforurening
 europæisk status · 37
 klassisk · 52
Blyproduktion · 52
Bronze · 35
Brundtlandrapporten · 88
Bygninger, nedbrydning af · 29

C

CFC'er · 67
 og drivhuseffekt · 79
 og ozonnedbrydning · 72
 udslip · 71
 virkning af · 71
Chlorfluorcarboner · 67

D

De Forenede Nationers Øko-
 nomiske Kommission for
 Europa · 43

Dieseltrafik · 32
Drivhuseffekt · 76
Drivhusgasser · 78, 79
 i fremtiden · 80

E

EMEP · 43
Energiforbrug, globale · 14
Engelsk syge · 29
England, luftforurening i · 27
European Monitoring and
 Evaluation programme · 43

F

Ferskvandsforsuring · 45
Forsuring · Se også sur nedbør
 og syreregn
 af ferskvand · 45
 af nedbør · 44
Forurening · 11
Forureningsmålinger, tidlige · 35
Forureningsudslip · 13, Se også
 udslip
Fossile brændsler · 13
Fotokemisk luftforurening · 53
Fotokemisk smog · 54
Fotokemiske reaktioner · 55
Freon · 67

G

Gaia-teorien · 18
Gas · 13
Geneve Konvention om Lang-
 trækkende, Grænseover-
 skridende Luftforurening · 63
Globalt opvarmningspotentiale
 · 78
GWP · 78
Göteborgprotokol · 63

I

Ildsteder · 26
Ilt · 18
Indendørs luftforurening · 26
Industriforurening · 30
Industriproduktion, globale · 14
Inversion · 19
IPPC · 78

K

Kalkbrændning · 27
Klima · 82
Klimaforandringer · 82
Klimakonventionen · 89
Klimaændring
 forskellige faktorerers betyd-
 ning · 80
 indtrådte · 84
 virkninger af · 85
 økonomiske konsekvenser · 88
Kobber · 52
Kritisk belastning · 46
Kul · 13
Kulbrinter · 18, 54
 koncentration i København · 31
 udslipsreduktion · 36
Kuldioxid
 betydning for Jordens varme-
 balance · 77
 dannelse · 18
 fremtidens koncentration i
 atmosfæren · 81
 historiske data · 11
 omsætningstid for · 22
 som drivhusgas · 79
Kuldioxidudslip · 35
Kulilte, udslipsreduktion · 36
Kulilteforurening · 37
Kulstofkredsløb · 21

Kunstværker, nedbrydning af · 29
Kvælstof · 18
Kvælstofdioxid · 58
Kvælstofdioxidforurening · 37
Kvælstofforbindelser, omsætnings-tider for · 21
Kvælstofmonoxid · 55
Kvælstofoxider · 44, 54
 udslipsreduktion · 36
København, luftforurening i · 31
København-aftalen om CFC'er · 73

L

Langtransport · 42
Lattergas · 79
LMP · 36
London-aftalen om CFC'er · 73
London-smog · 29
Londontåge · 29
Los Angeles-smog · 53, 56
Luftforurening
 beregning af fortidens · 22
 beregning af spredning · 22
 Englands · 27
 fotokemisk · 53
 fremtidens · 15
 historiske data · 31
 hovedårsager til · 13
 indendørs · 26
 indirekte oplysninger om · 28
 Københavns · 31
 og økonomisk udvikling · 39
 primær · 13
 sekundær · 13
 som plantegødning · 46
 spredning af · 20, 42
 virkninger på helbred · 26
Luftkvalitetsmåleprogram · 36
Lyngheder · 46

M

Materialeskader · 29, 34
Mellemstatslige Klimapanel · 78
Metan · 79
Modelberegninger
 af byforurening · 30
 af Københavns luftforurening · 31
 af luftforurening · 22
Montrealprotokol · 73
MTBE · 36

N

Natriumsulfat · 30
Nitratradi-kaler · 58

O

ODP · 72
Olieprodukter · 13
Opvarmning, global · 77
Opvarmningspotentiale, globalt · 78
Ozon · 19, 53
 dannelse af · 54
 koncentration i luften · 55
 måleserier · 54
 skade på afgrøder · 59
 som drivhusgas · 79
 spredning · 58
 sundhedsvirkninger af · 59
Ozonbekæmpelse · 60
Ozondannelse · 57, 68
Ozonforurening · 37, 54
Ozongennembrud · 54
Ozonhul · 67
Ozonkoncentration · 19
Ozonlag · 66
Ozonlagsudtynding · 66
 klimavirkninger af · 69
 sundhedsvirkninger af · 70
 økologiske virkninger af · 69
Ozonnedbrydning · 66-68
Ozonnedbrydningspotentiale · 72

P

PAN · 58
Partikler · 32, 36, 37
 og drivhuseffekt · 79
Peroxyacetyl-nitrat · 58
Planetare grænse-lag · 20
Polar vortex · 69
Primær luftforurening · 13
Prognoser · 15

R

Røde rødgraner · 86

S

Salpetersyre · 44, 58
Saltsyre · 30
Sandsten, nedbrydning af · 35
Scenarier · 15
Sekundær luftforurening · 13
Skovdød · 47, 48
Smog
 London- · 29
 Los Angeles- · 53
Smog-episode · 30
Stabiliserings-scenarier · 81
Stofkredsløb · 20
Stratopause · 19
Stratosfære · 19
Sundhedsskader · 29
Sur nedbør · 44, Se også forsuring og syrerregn
Surhedsgrad
 de ferske vandes · 45
 nedbørens · 44
Svovldioxid · 18, 44
 koncentration i København · 31, 36
 koncentration i luften · 30
 materialeskader · 35
 måleserie fra København · 36
 udslip · 34
Svovlforbindelser, omsætnings-tider for · 21

Svovlforurening

Danmarks eksport af · 43

Danmarks import af · 43

Svovlsyre · 44

Svovludslip · 49

Syreregn · 44

T

Temperatur, fordeling i atmo-
sfæren

· 19

Temperaturstigning · 82

virksomheder af · 85

Tropopause · 19

Troposfære · 19

Tungmetaller · 51

Tåge · 29

U

Udslip

bly · 36

CFC- · 71

kulbrinte- · 36

kuldioxid- · 35

kulilte- · 36

kvælstofoxid- · 36

svovl- · 50

svovldioxid- · 34

UNECE · 43

UV-stråling · 19

V

Vandstandsstigning · 83

virksomheder af · 87

Varmebalance, Jordens · 76

Verdensbefolkning · 13, 38

W

Wien-konvention · 72

Luftforureningens historie

Jes Fenger

Luftforurening er ikke noget nyt problem, ej heller et problem, vi mennesker er eneansvarlige for. Men det er et problem, som for nogle stoffers vedkommende er vokset ud over alle grænser både i betydning og i geografisk skala. Omvendt er der også en række luftforureninger, som vi har fået styr på.

I denne bog fortæller en af landets mest erfarne atmosfæreforskere om forskellige sider af luftforureningen og deres ændringer igennem tiderne. Bl.a. kan man læse om

- luftforureningens sammenhæng med den økonomiske vækst
- byforurening fra Bronzealder til nutid
- luftforureningens spredning fra kilden til den ganske verden
- ozonhullet
- den globale opvarmning

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

ISBN 87-7739-740-1



Danmarks Miljøundersøgelser
Miljøministeriet