



# ***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

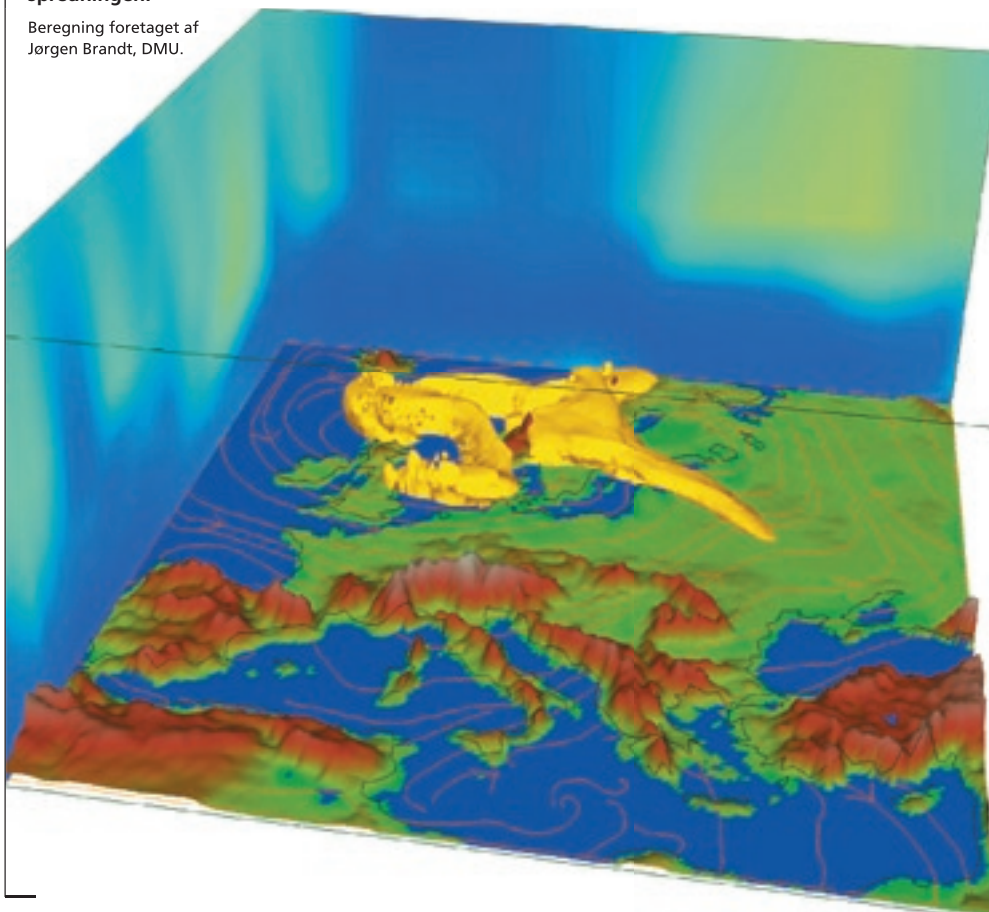
Computersimulering af et forureningsudslip fra et område i Midtengland med mange kraftværker. Udslippet antages at starte 23. oktober 1994 kl. 16.00, og røgfanen har allerede efter et døgn nået Danmark. Derefter bøjer den mod nordvest styret af et lavtryk over Færøerne. En del af forureningen spredes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

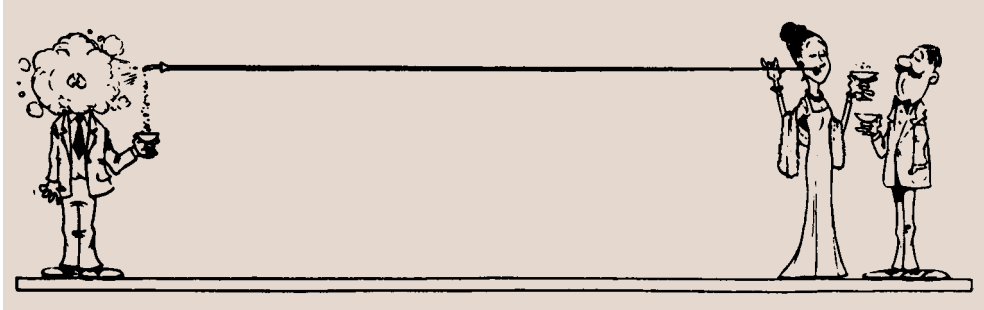
Beregning foretaget af Jørgen Brandt, DMU.

## 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.

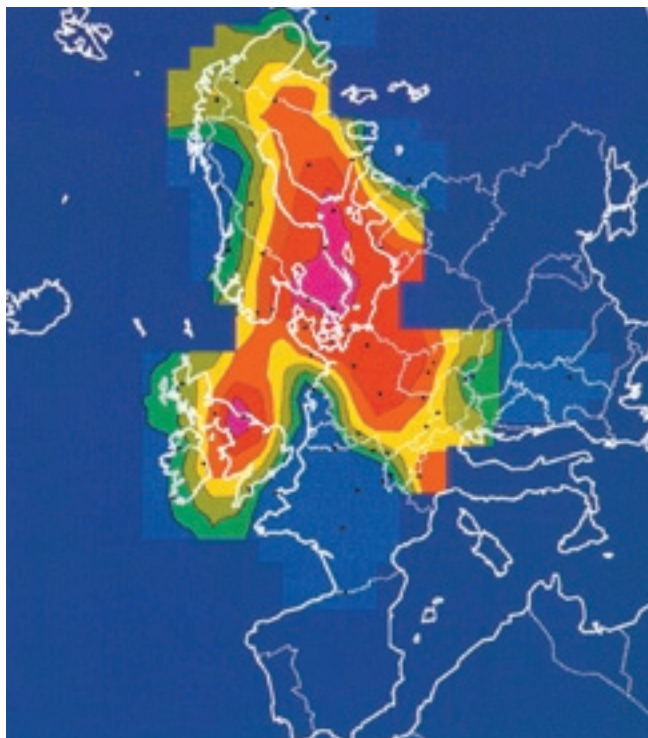
I store områder i det nordlige Europa var nedbørens pH nede omkring 4,5 i 1990'erne, dvs. den indeholdt 10 gange så mange brintioner som »naturlig« nedbør (figur 4-4).

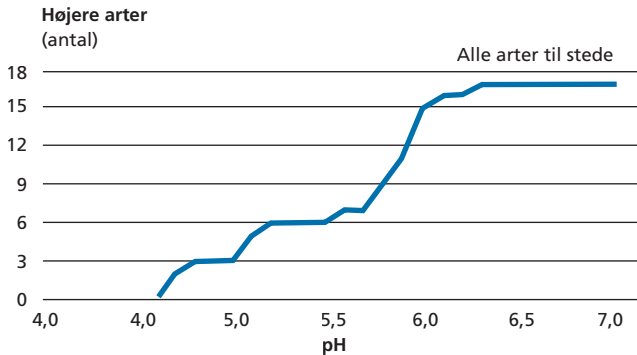
### Årsagerne til sur nedbør

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 ( $\text{HCO}_3^-$ ), 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 græsheder.

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.





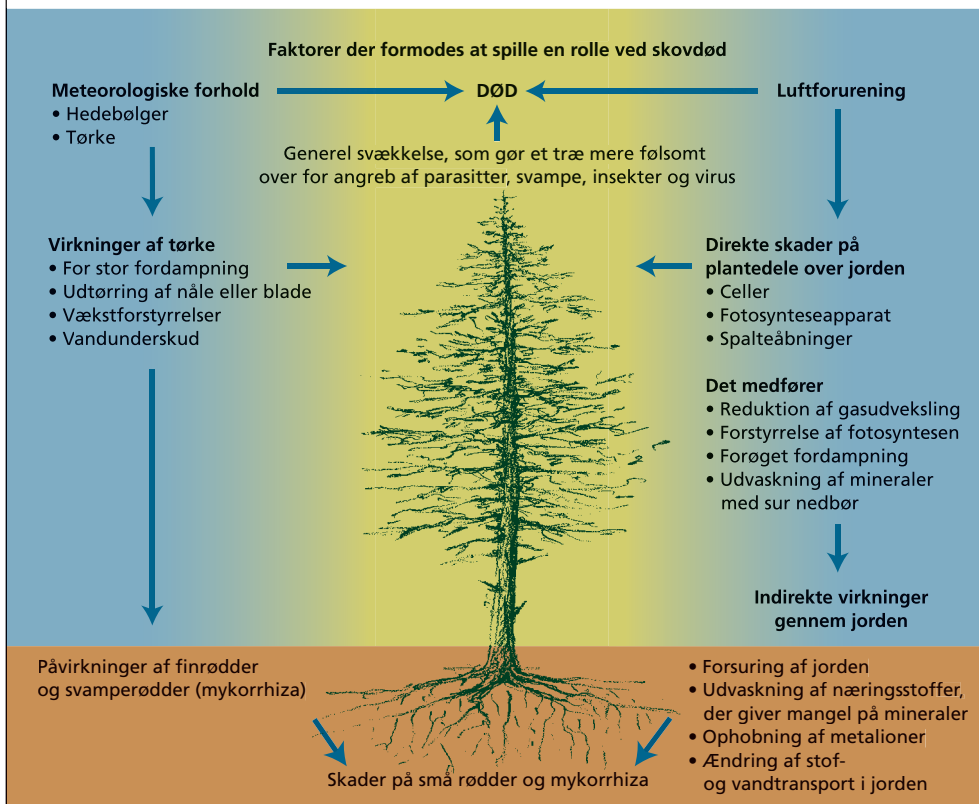
### En ny type skader

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.**

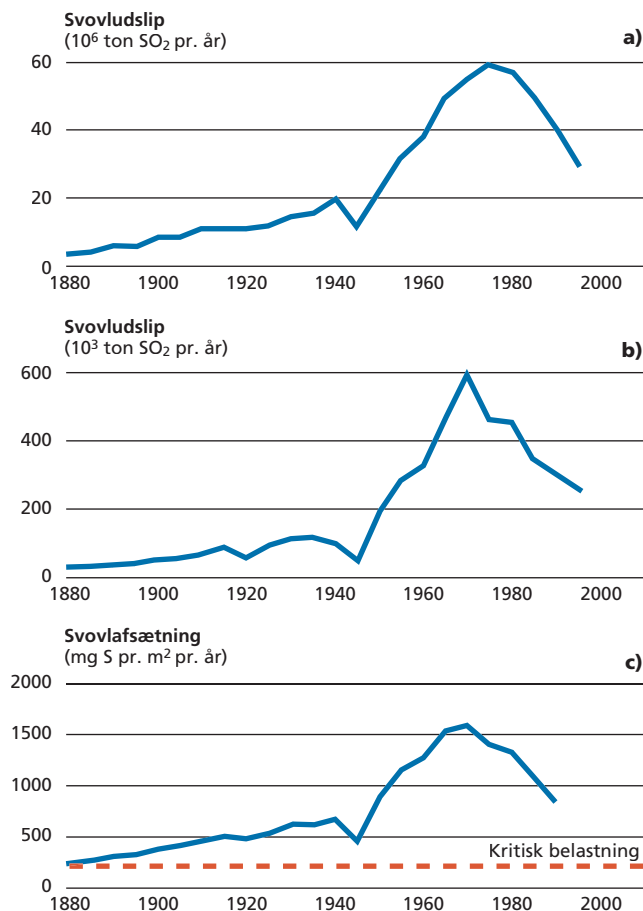
**c) Den tilsvarende svovlaf-sætning i Sydsverige sammenlignet med 5 % kritisk belastning (dvs. 5 % af økosystemerne skades) (side 46).**

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

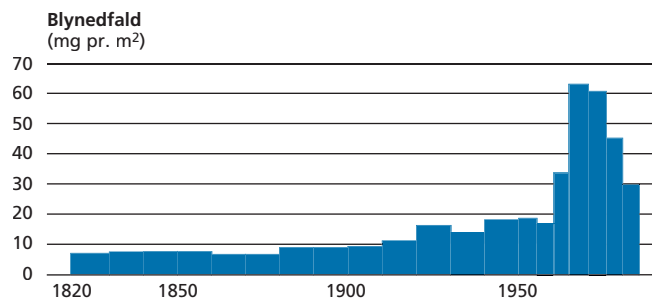
Forurening med tungmetaller er som tidligere nævnt startet indendørs allerede med anvendelse af ild til lys og varme i klippehuler. Fra industrielle anvendelser er forureningen imidlertid blevet langtransporteret.

### 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  $^{210}\text{Pb}$ , 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.

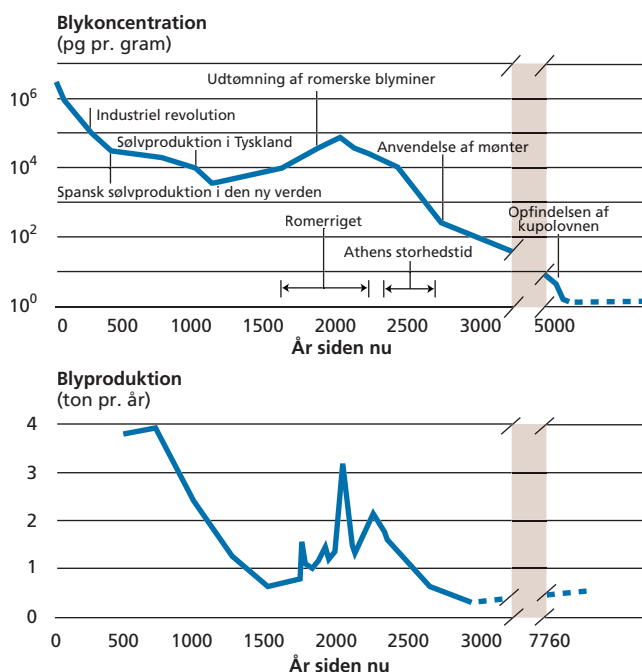
Hvordan der har set ud i lokalområder med udvindingsmetoder, der sendte 5 % af blyproduktionen lige ud i luften, og hvor blyet blandt andet blev brugt til vandrør og sødemidler, er et studium i sig selv. Nogle forskere har endda ovovet den påstand, at omfattende blyforgiftning kunne være en medvirkende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

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.

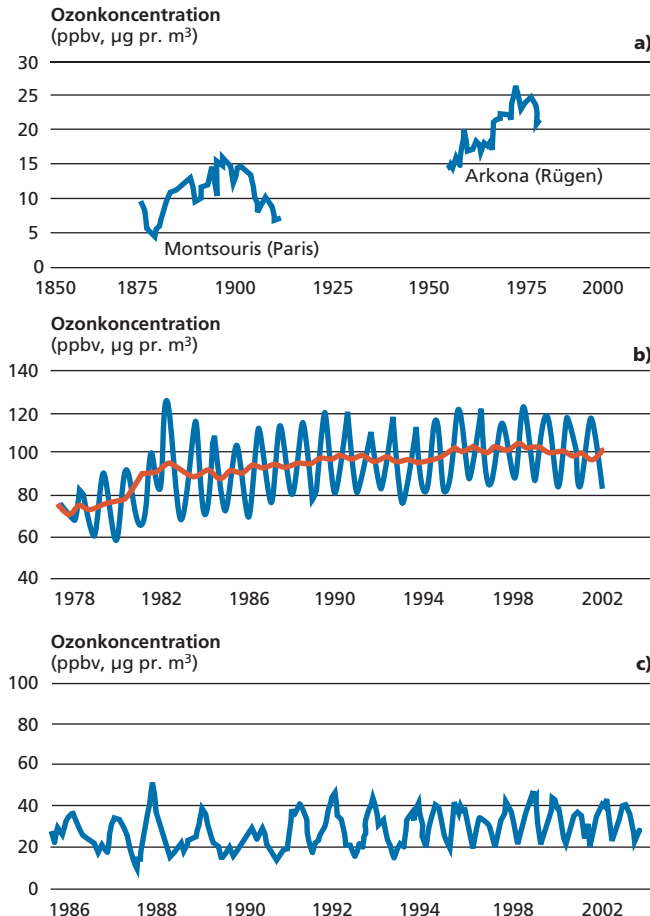
Undertiden kan der ske direkte ozongennembrud af tropopausen; det kan medføre koncentrationer på over 100 ppb og

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).

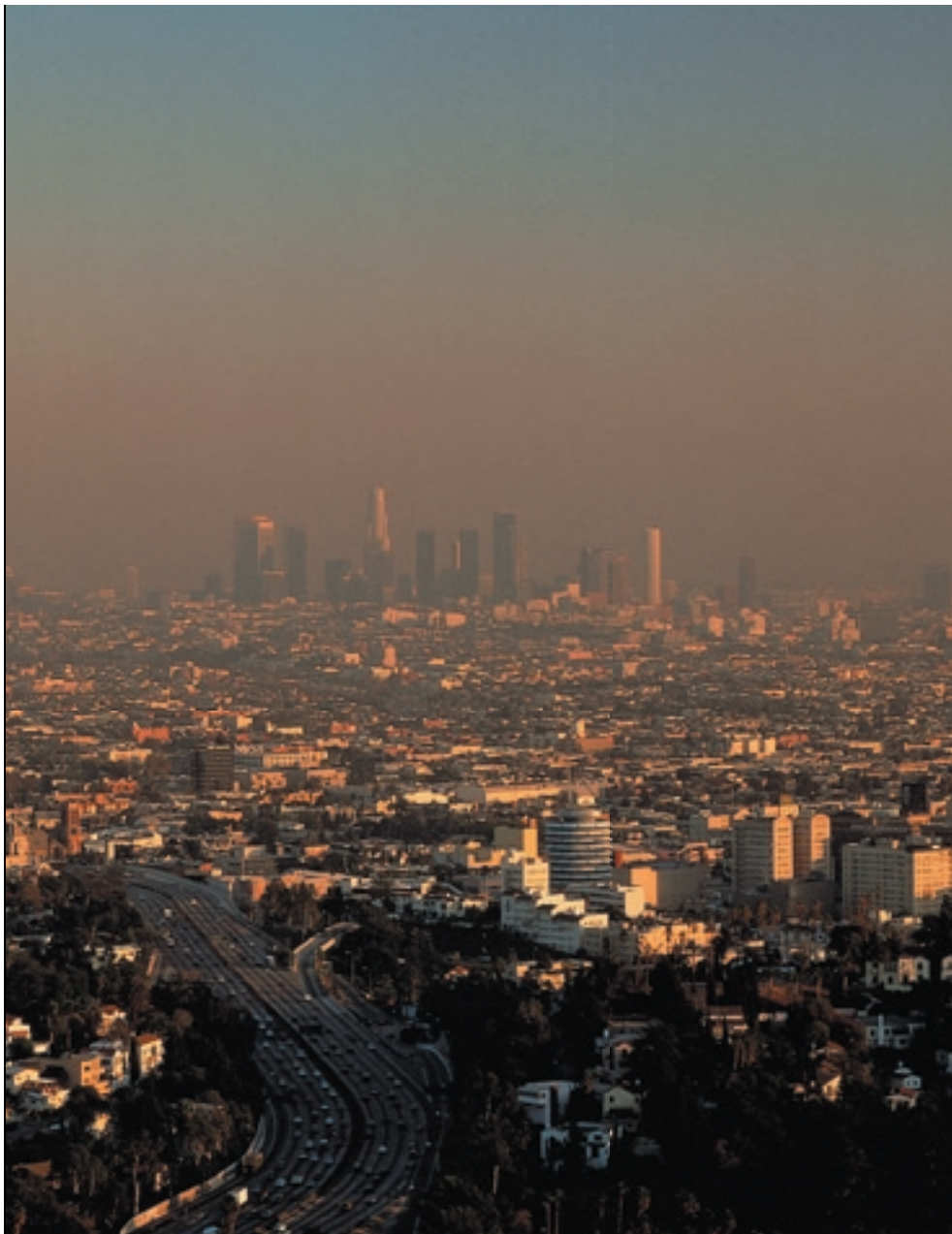
**b) Månedlige gennemsnit af ozonkoncentrationen målt på Zugspitze (2962 m) i Syd-Tyskland.** Man kan se tydelige årtidsvariationer, men en udjævnet kurve (rød) viser, at langtidsvæksten nu stort set er gået i stå.

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 årtidsvariation, men ingen langtidstendens.

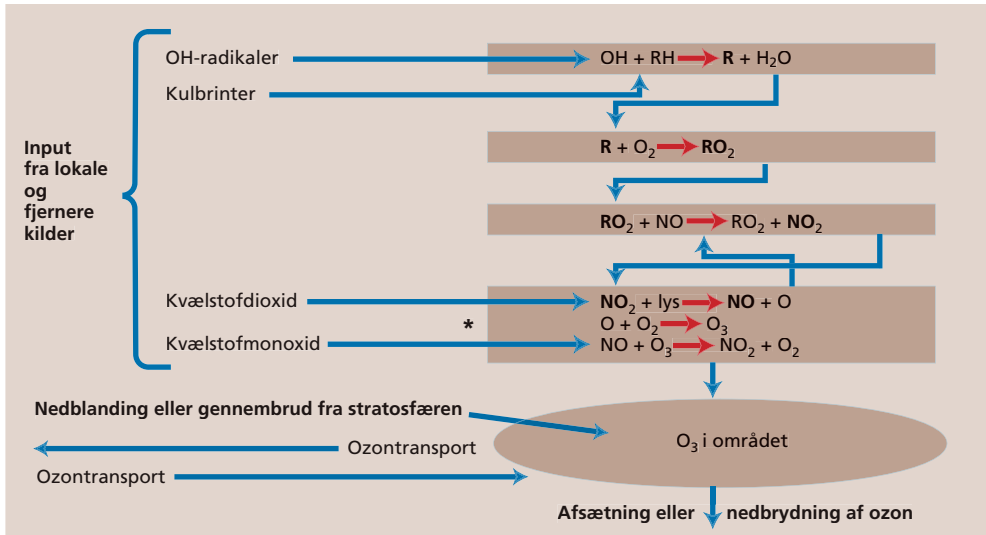
Data fra DMU.

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.

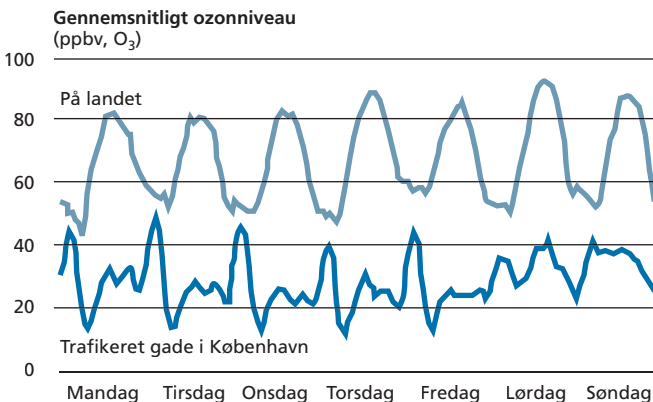


Figur 4-16

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 (O<sub>3</sub>) i troposfæren, ved at sollys med en bølgelængde mindre end 400 nm spalter kvælstofdioxid (NO<sub>2</sub>) 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 O<sub>3</sub> afhæng af forholdet mellem NO<sub>2</sub> og NO.

Imidlertid er der flere reaktioner i atmosfæren, som ændrer forholdet mellem NO og NO<sub>2</sub>. Afgørende er flygtige organiske kulbrinter, der kan omdannes til forbindelser, der reagerer med kvælstofmonoxid (NO) og danner kvælstofdioxid (NO<sub>2</sub>). 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 NO<sub>2</sub> (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 (NO<sub>3</sub>), der bl.a. kan blive til salpetersyre. Herved bliver fotokemisk luftforurening koblet til forsurening.

### Langtransporteret ozon

Grænseoverskridende forurening blev først studeret i forbindelse med forsuringfænomener 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.

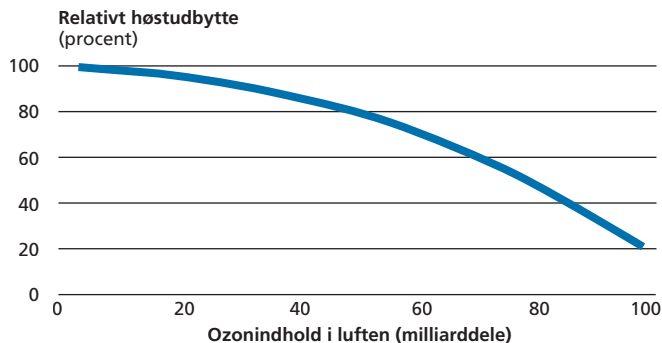
Man ved endnu ikke, hvor meget fotokemisk luftforurening betyder for planter i naturen, men som vist side 47 har ozon formentlig også spillet en rolle ved »skovdøden«.

### 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.

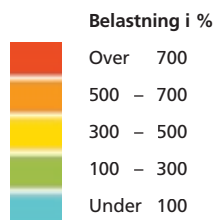
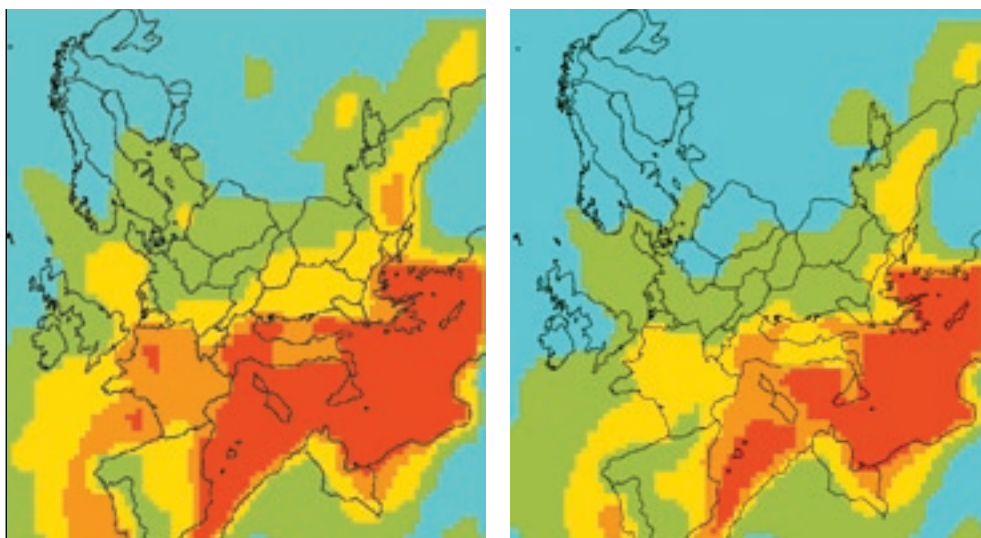
menneskeskabte kilder til ozon. Man kan derfor heller ikke opstille grænseværdier for udslip af ozon, sådan som man fx har grænser for, hvor meget svovl, der må være i fyringsolie, og hvor meget kulilte, der må komme ud af en bil.

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 SO<sub>2</sub> være reduceret med mindst 63 %, NO<sub>x</sub> 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.

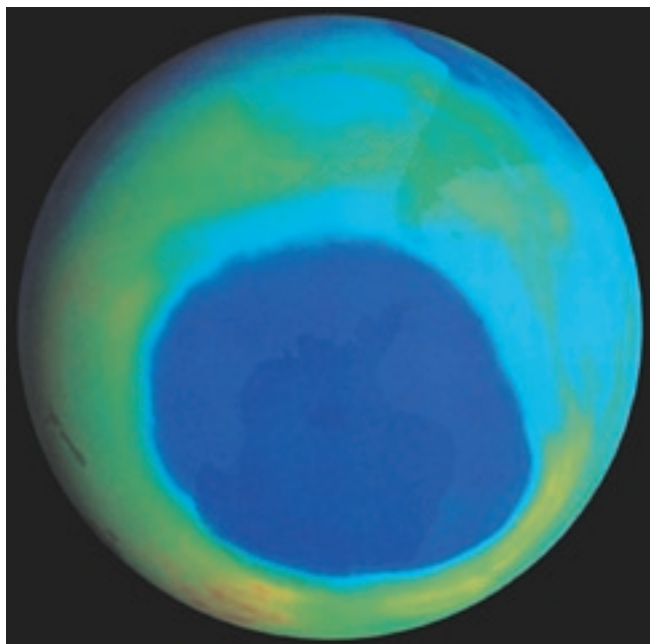
Eksistensen af et ozonlag i stratosfæren var blevet diskuteret allerede i begyndelsen af 1930'erne, men først med en stor målekampagne i det geofysiske år 1957 blev der foretaget grundigere udmålinger. Indtil begyndelsen af 1970'erne havde ingen dog tænkt sig muligheden af, at menneskelige aktiviteter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

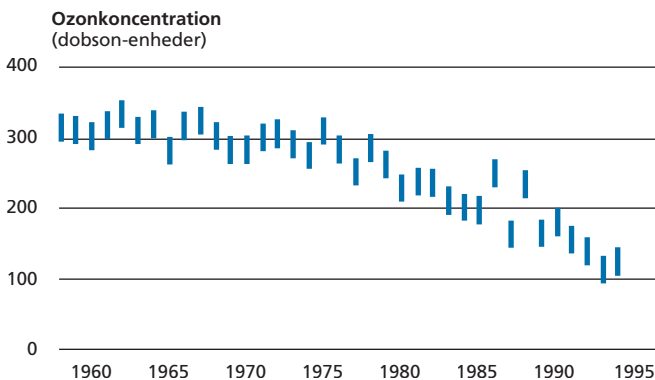
### Freon som årsag

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

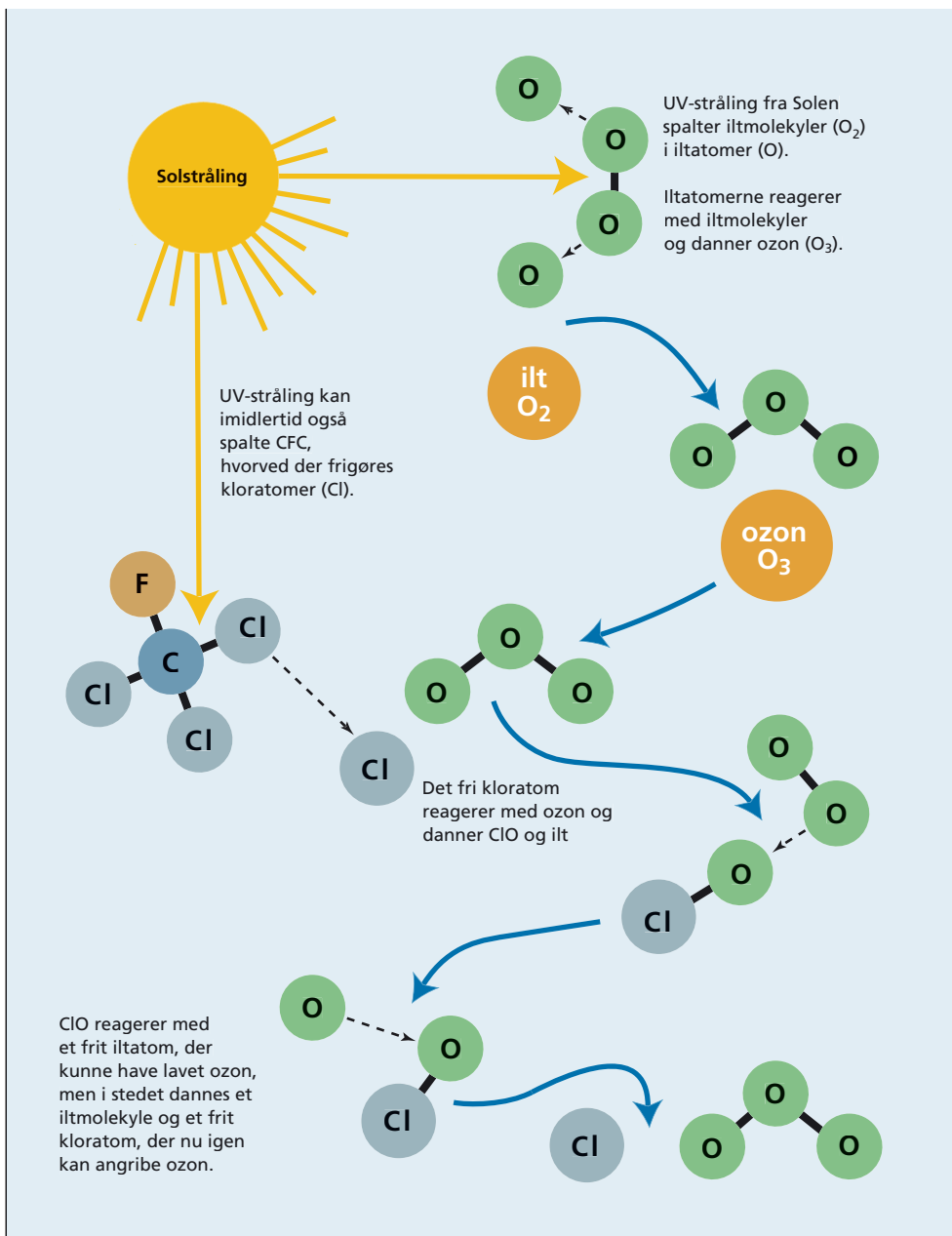
Når freonforbindelserne kommer op i ozonlaget, vil de imidlertid blive spaltet af den kraftige ultraviolette stråling, hvorved der frigøres kloratomer. Gennem kædereaktioner kan hvert af disse kloratomer nedbryde mange tusind ozonmolekyler (figur 5-3).



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.

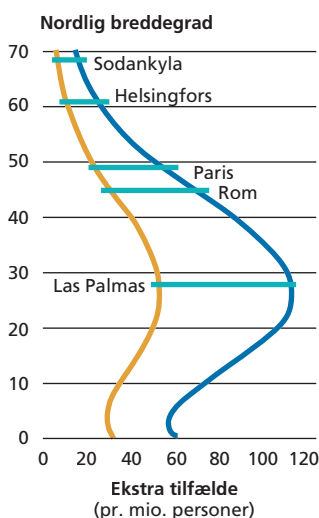
Det vil igen kunne få konsekvenser for klimaet. Havenes planktonalger optager nemlig store mængder kuldioxid, og enhver ændring i UV-strålingen vil derfor kunne påvirke det globale kulstofkredsløb (side 21) og dermed atmosfærens indhold af kuldioxid. Herved påvirkes Jordens varmebalance og følgelig det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

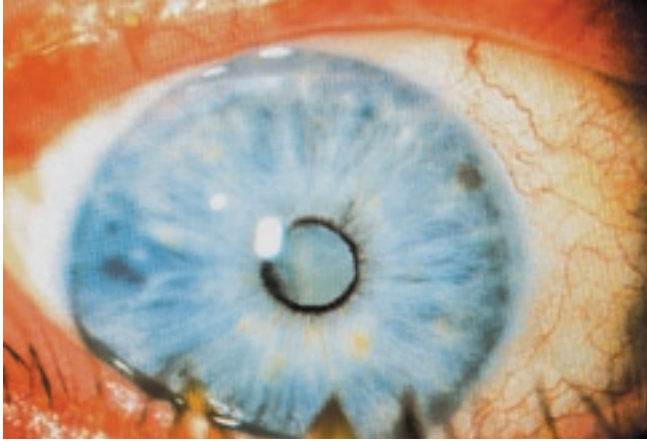
### Sundhedsskader

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.

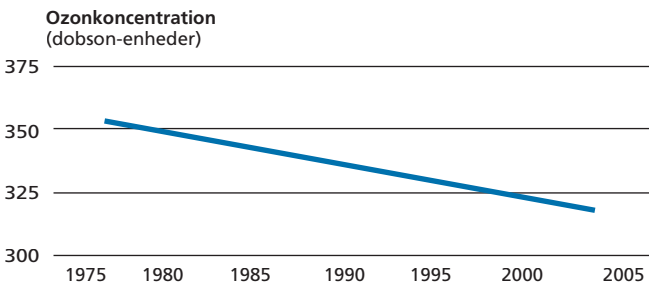
Specielt er DNA i hudceller følsomt over for UV-B-stråling og de kan udvikle hudkræft. Det er anslået, at 1 %'s reduktion i den totale ozonmængde vil medføre en 2 %'s stigning i antallet af hudkræfttilfælde. Betydningen for udvikling af modermærkekræft er mindre klar.

### 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.

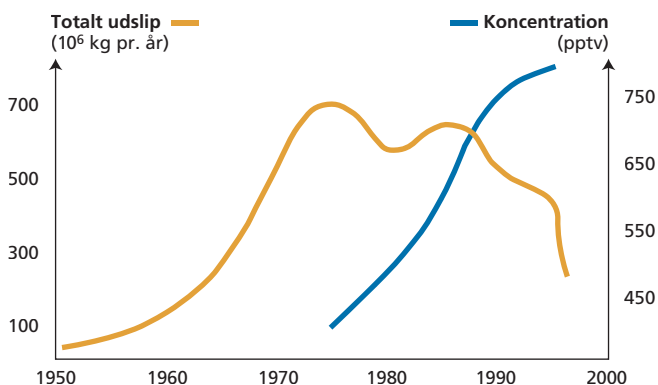
### Den internationale indsats

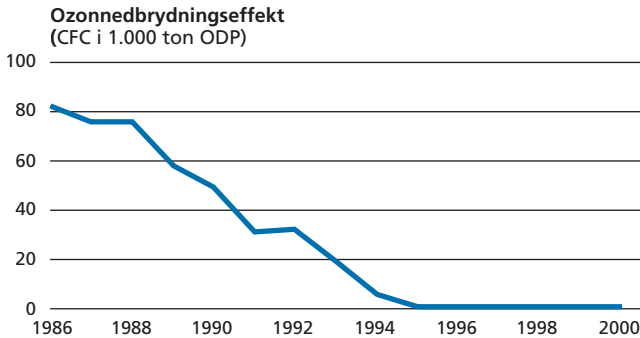
Efter at årsagen til ozonlagsudtyndingen var blevet fastslået, varede det ikke længe, før arbejdet med at udforme en international rammekonvention om beskyttelse af ozonlaget begyndte. Resultatet blev den såkaldte Wien-konvention, der blev undertegnet i 1985.

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.



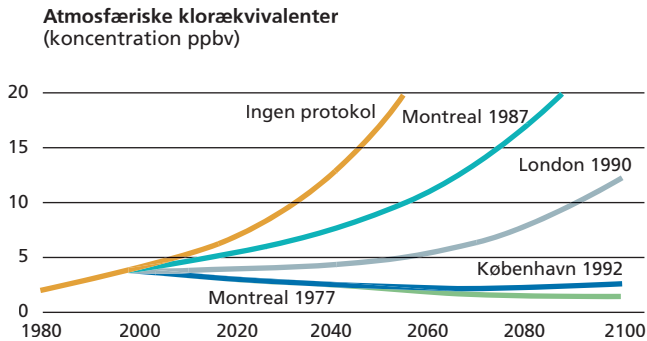


Figur 5-9

**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.

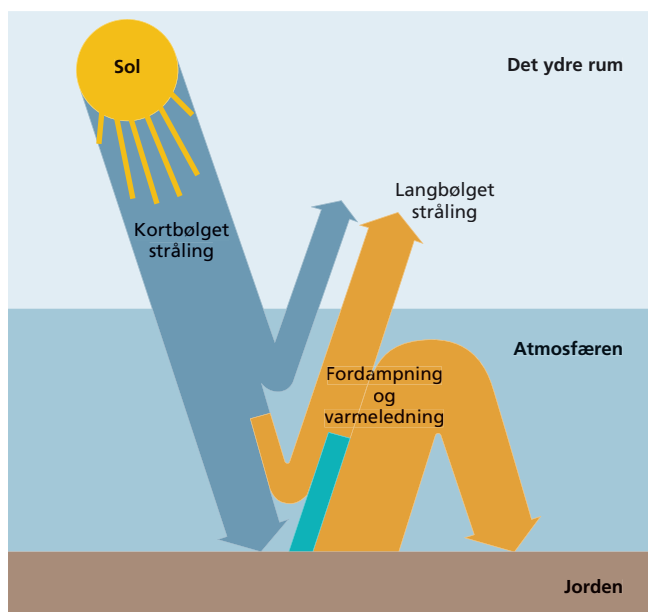
For det første hænger fremskrivningerne i høj grad på modelberegninger. For det andet vil de forventede virkninger ramme forskellige områder forskelligt med både vindere og tabere. Og endelig omfatter forsøg på en bekæmpelse globale indgreb i både energi- og fødevarereproduktion – en opgave der alvorligt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

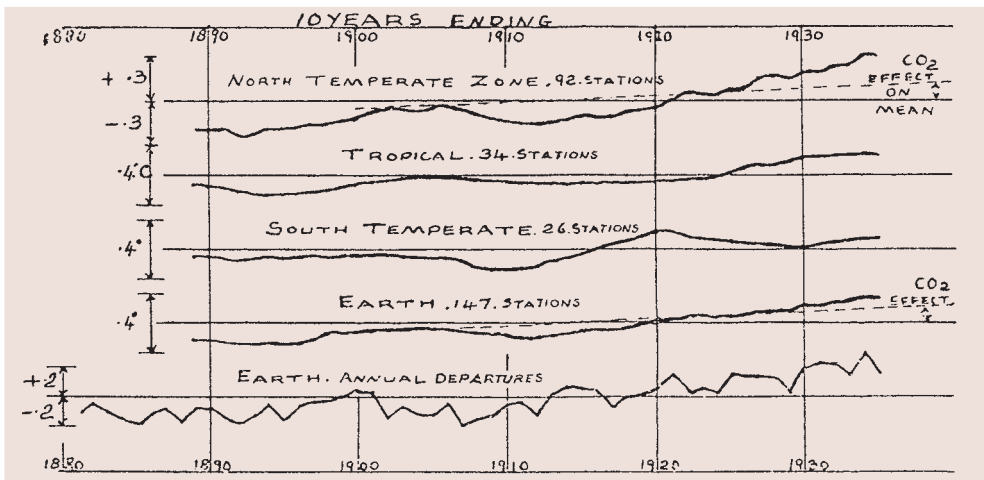
### Tidlige undersøgelser

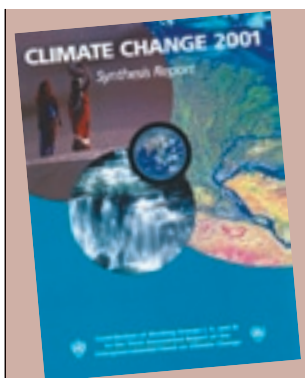
Allerede i midten af forrige århundrede var man klar over, at atmosfærens indhold af kuldioxid var afgørende for Jordens varmebalance. I 1896 vurderede svenskeren Arrhenius, at en fordobling af kuldioxid-koncentrationen ville medføre en global temperaturstigning på 5-6° C. Det var dog først i slutningen 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 omsætningsstid 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**

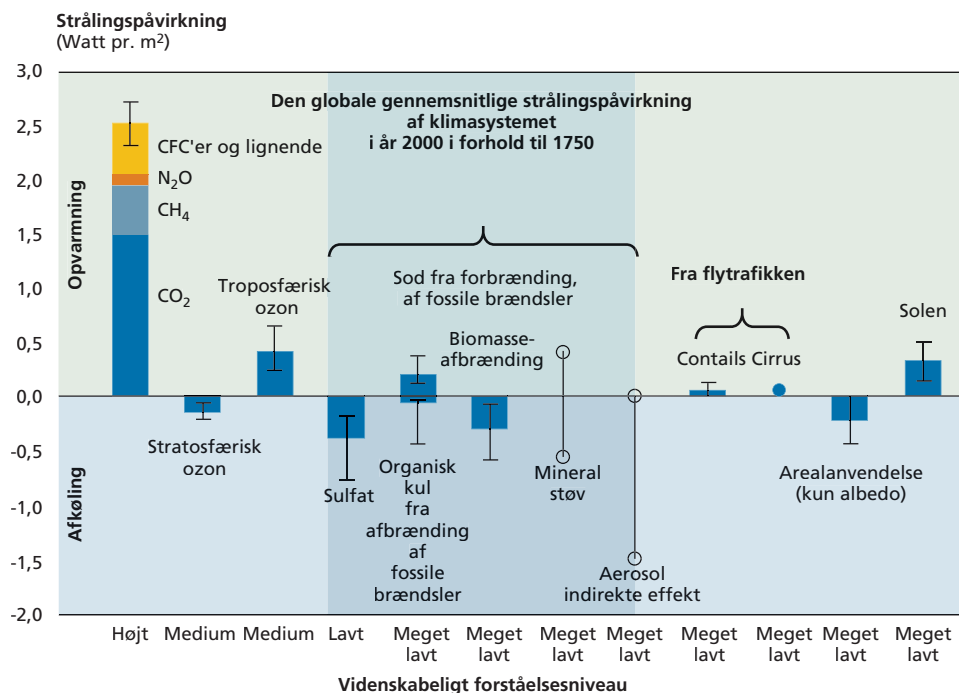
En stærkt diskuteret virkning af sulfatpartikler, der skyldes svovlforurening, er svært at vurdere, men den har indtil nu antagelig delvis modvirket den forøgede drivhuseffekt. Med en begrænsning af svovludslippet (der af andre grunde er ønskværdig) vil virkningen aftage.

**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

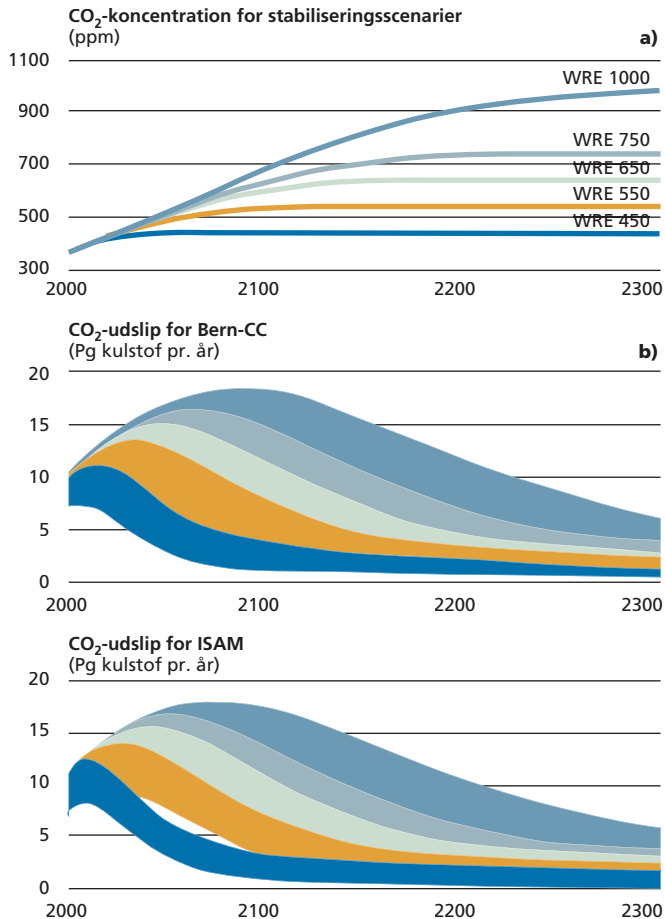
Ud fra forskellige forudsætninger om befolkningstilvækst, økonomisk vækst, energieffektivitet og tilgængelighed af



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 CO<sub>2</sub>-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 udslipforløb 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).



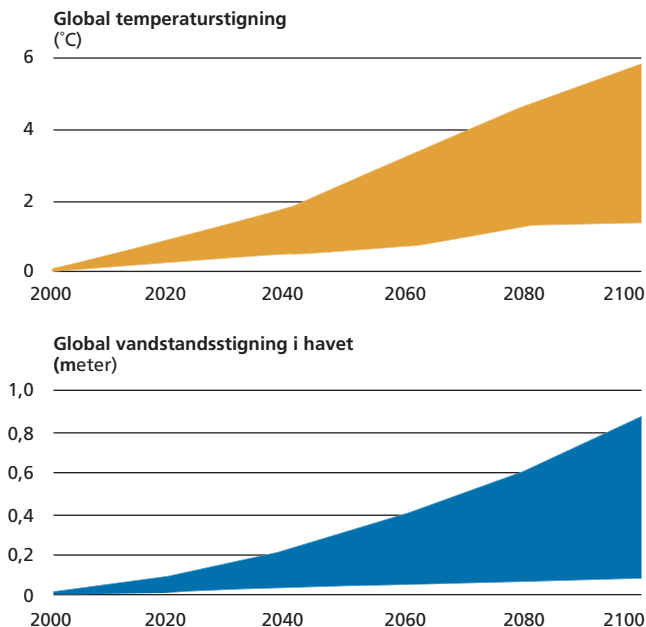
**Figur 6-7**  
Store computere er en forudsætning for detaljerede klimaberegninger.

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 CO<sub>2</sub>-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.

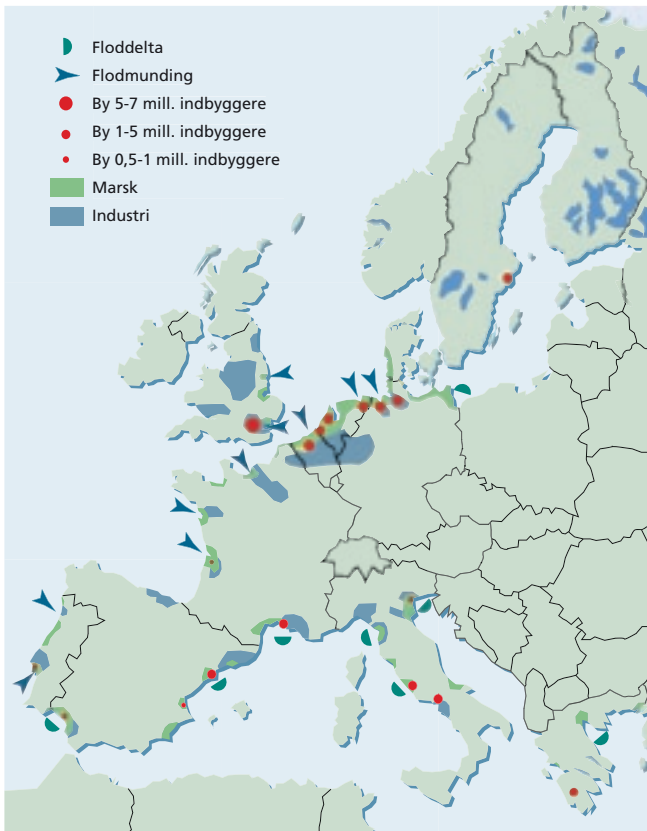


## Stigningen i havenes vandstand

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.

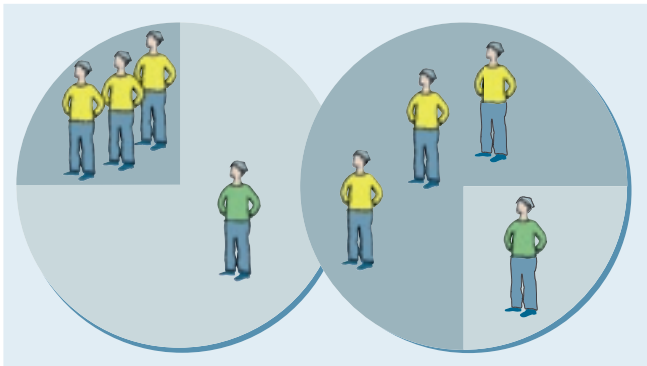
## Den globale situation

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 CO<sub>2</sub>-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. Mellempfolkeligt 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  
 Nitratradikaler · 58

**O**

ODP · 72  
 Olieproducter · 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  
 Peroxyacetylinitrat · 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