

# En atmosfære med voksende problemer...

Luftforureningens historie

---

Jes Fenger

Miljø- og Energiministeriet  
Danmarks Miljøundersøgelser  
1997

TEMA-rapport fra DMU, 11/1997  
En atmosfære med voksende problemer...  
Luftforureningens historie

Forfatter: Jes Fenger  
Danmarks Miljøundersøgelser, Afdeling for Atmosfærisk Miljø  
URL: <http://www.dmu.dk>  
Udgiver: Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser  
Udgivelsestidspunkt: Juli 1997

Layout, illustrationer og produktion: Grafisk Værksted, DMU, Roskilde  
Tryk: Scanprint as  
Oplag: 1.500  
Sidetal: 64  
Papirkvalitet: Cyclus Print

Gengivelse tilladt med kildeangivelse  
ISSN: 0909-8704  
ISBN: 87-7772-336-8

Pris kr. 90,-  
Klassesæt á 30 stk kr. 1.350,-  
Abonnement, 5 numre kr. 225,-  
(Alle priser er incl. 25% moms, excl. forsendelse)

Købes i boghandelen eller hos:

*Danmarks Miljøundersøgelser  
Frederiksborgvej 399  
Postboks 358  
4000 Roskilde  
Tlf. 4630 1200  
Fax 4630 1114*

*Miljøbutikken  
Information og bøger  
Læderstræde 1  
1201 København K  
Tlf. 3392 7692 (Information)  
Tlf. 3337 9292 (Bøger)*

# Indhold

Forord .....	5
<b>Baggrunden</b>	
I de gode gamle dage .....	6
Atmosfærens opbygning .....	8
Kredsløb og spredning .....	10
Den globale vækst .....	12
<b>Byerne</b>	
Det forurenede England .....	14
London smoggen .....	16
København i Guldalderen .....	18
Problemer og løsninger .....	20
Den moderne storby .....	22
<b>Langtransport</b>	
Forurening uden grænser .....	24
Syreregnen .....	26
Skovdøden .....	28
Bedre, men endnu ikke godt nok! .....	30
Tungmetaller før og nu .....	32
<b>Fotokemisk luftforurening</b>	
Los Angeles smoggen .....	34
Hvor kommer ozonen fra? .....	36
Effekter og bekæmpelse .....	38
<b>Ozonlaget</b>	
Hullet i himlen .....	40
Den onde og den gode ozon .....	42
På rette vej, men langsomt .....	44
<b>Drivhuseffekten</b>	
Varmedøden .....	46
Drivhusgasserne .....	48
Fremtidens klima .....	50
Livet i en varmere verden .....	52
<b>De store linier</b>	
Når vi det? .....	54
Det hele hænger sammen .....	56
Sammendrag .....	58
<b>Bilag</b>	
Litteratur .....	61
Danmarks Miljøundersøgelser .....	63
Tidligere Temarapporter .....	64



*Menneskenes og dyrenes  
flugt fra syndfloden som  
fremstillet af Gustave Doré  
(1833-83)*

# Forord

Mange tror, at luftforurening er et moderne fænomen knyttet til de seneste hundrede års industrialisering. Det er imidlertid en sandhed med interessante modifikationer.

Menneskene har påvirket atmosfæren lige siden de begyndte at udnytte ilden. Omfanget og konsekvenserne af denne påvirkning er efterhånden vokset til globale dimensioner, og vi er nu i gang med en udvikling med så megen inert, at den ikke umiddelbart kan stoppes. Generelt er der ikke tale om dommedagsprofetier, men for nogle kan syndflodssituationen fra Gustave Dorés billedbibel godt gå hen og blive alvor.

I den politiske og offentlige debat behandles luftforureningsproblemer ofte ét ad gangen. Men de basale fænomener sker alle i den samme atmosfære og er derfor mere eller mindre koblet sammen. De er også koblet til miljøproblemer af andre typer: Vandforurening, jordforurening osv. Endelig er virkningerne af miljøændringer normalt et resultat af en kompleks påvirkning.

Denne rapport fortæller historien om luftforureningen og forsøgene på at bekæmpe den. Og den viser samtidig koblingen mellem de enkelte fænomener. Rapporten indledes derfor med en kort generel beskrivelse af atmosfærens opbygning og forureningens spredning.

Fremstillingen er i det væsentlige baseret på den litteratur, der er vist i listen side 61-62, og som også kan benyttes til supplerende læsning. Hvor der foreligger danske oversættelser af udenlandske værker, er disse angivet i stedet for de originale arbejder.

Generelt er rapporten skrevet uden direkte litteraturhenvisninger, men i enkelte tilfælde, hvor der er benyttet upubliseret materiale, er dette angivet i teksten. Flere af de anvendte figurer er brugt af mange forfattere i forskellige sammenhænge; hvor der er angivet en kilde, er denne den benyttede og dermed ikke nødvendigvis den primære. Forfatteren takker alle, der har bidraget med materiale og kommentarer.

# I de gode gamle dage

I 1866 er H. C. Andersen i Paris og skriver i sin dagbog den 13. april om, hvordan han sidder og kigger på *"nogle vistnok døde Træer, de havde som jeg ikke kunnet tåle Pariser Luften, og da de ikke kom afsted, vare de gaaet ud"*. Samme år udkommer Ibsens poetiske drama *"Brand"*, hvor titelpersonen i sidste akt ud-bryder:

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

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

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

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

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

I følge "Nye ord i dansk 1955-75" optræder ordet forurening faktisk først som begreb på dansk i slutningen af tredserne, hvorefter det i løbet af få år bliver udbredt til at omfatte stort set enhver form for forurening: Knallertforurening, visuel forurening - og selvfølgelig også luftforurening.

Og så viser det sig alligevel, at Emma Gad (hende med "Takt og Tone") allerede i 1903 i "Vort Hjem" skrev "at holde Luften i vor Bøllig frisk og fri for Forureninger er en meget vigtig Opgave". Hun skrev også "at det elektriske Lys ikke forurener Luften," hvilket jo desværre - alt taget i betragtning - ikke er helt rigtigt.

*Reklameplakat af Ib Andersen  
for den britiske udstilling i 1932.  
Helt klart før røggasrensning  
blev moderne!*

# Atmosfærens opbygning

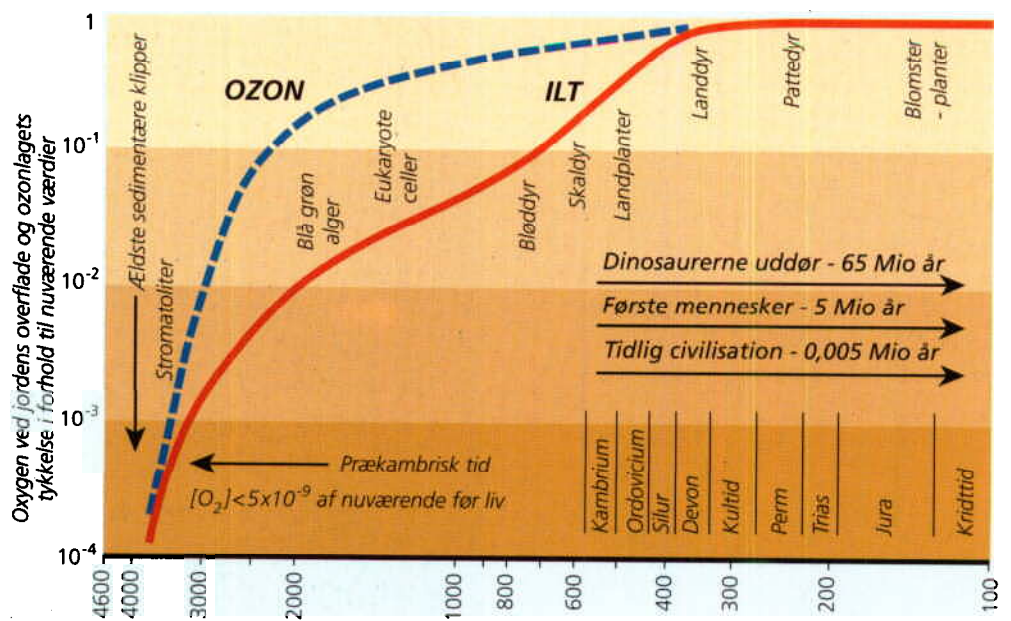
Jordens diameter er næsten 13.000 km, men fra bunden af det dybeste ocean til toppen af det højeste bjerg er der kun ca. 20 km. I dette tynde lag konkurrerer og vekselvirker de forskellige livsformer og påvirker derved deres omgivelser.

## Atmosfærens sammensætning

Jorden er omgivet af en kappe af luftarter: Atmosfæren. Op til omkring 100 kilometers højde er dens kemiske sammensætning stort set konstant, selvom der selvfølgelig sker et kraftigt fald i trykket. Regnet efter luftrumfang indeholder atmosfæren knap 21% ilt, 78% kvælstof, knap 1% argon og mindre mængder af en lang række andre stoffer. Selv luft, der er upåvirket af menneskelige aktiviteter, vil indeholde stoffer, som indgår i luftforurening - fx svovldioxid fra vulkaner og kulbrinter fra afdampning fra vegetation.

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

En stor del af kuldioxiden er blevet oplagret i form af kul, olie og gas. Når vi afbrænder dette fossile brændsel, dannes der igen kuldioxid, som sendes tilbage til atmosfæren. Men nu kan det, som vi skal se senere, give store problemer.



Udviklingen i atmosfærens indhold af ilt og den sideløbende opståen af ozonlaget.

På den vandrette akse er vist tiden i millioner år før nu.

Bemærk den logaritmiske skala.



## Gaia teorien

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

## Atmosfærens lagdeling

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

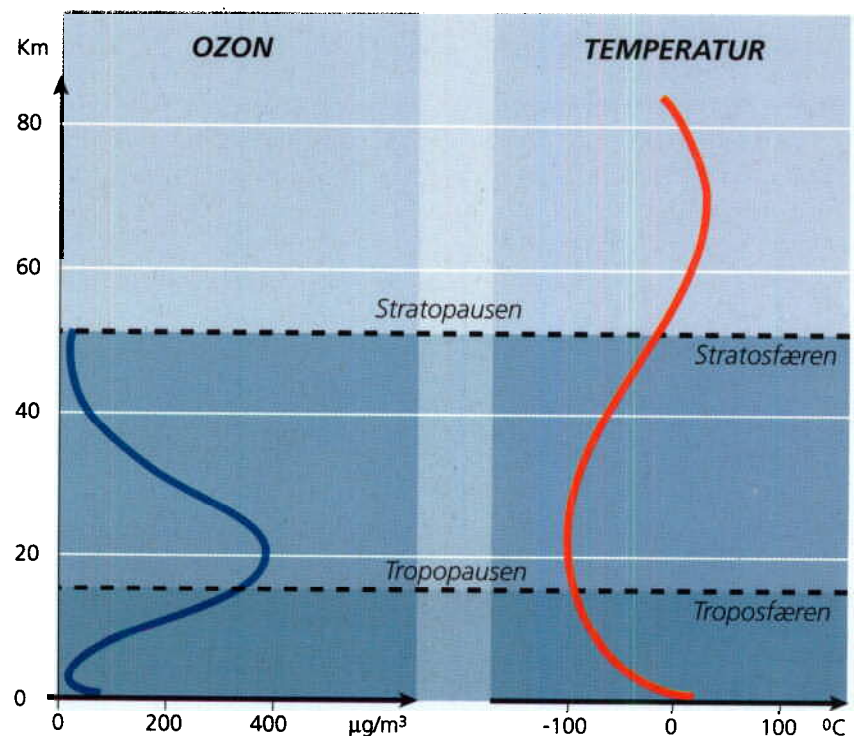
Dette er en af grundene til, at atmosfæren er opdelt i lag, der karakteriseres ved fallende eller stigende temperatur (figur).

Det er kun de nederste lag, der har interesse i forbindelse med luftforurening. I troposfæren, der er nærmest jorden, og hvor

alle vejrfænomener udspiller sig, falder temperaturen generelt med højden. I stratosfæren derimod stiger den på grund af energiabsorption i ozonlaget. Det er således lidt misvisende at tale om et ozonlag i stratosfæren, det er faktisk ozonlaget, der skaber stratosfæren ved at indføre en temperaturstigning (inversion), der forhindrer lodret opblanding - ganske på samme måde som de lavtliggende inversioner, der kan give anledning til smogepisoder ved i praksis at lægge et låg over forureningen.

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

Ozonkoncentrationen og temperaturfordelingen i den nederste del af atmosfæren. Energiabsorptionen i ozonlaget giver anledning til den temperaturinversion (stigende temperatur med højden), der skaber stratosfæren. Skillelinien mellem troposfæren og stratosfæren kaldes tropopausen. Stratosfæren afsluttes med stratopausen.



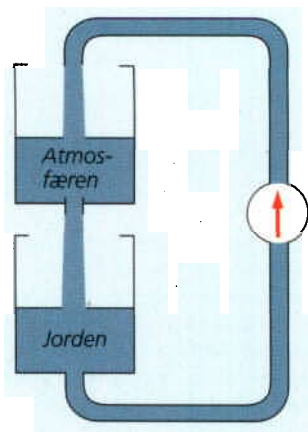
# Kredsløb og spredning

## Stofkredsløb

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

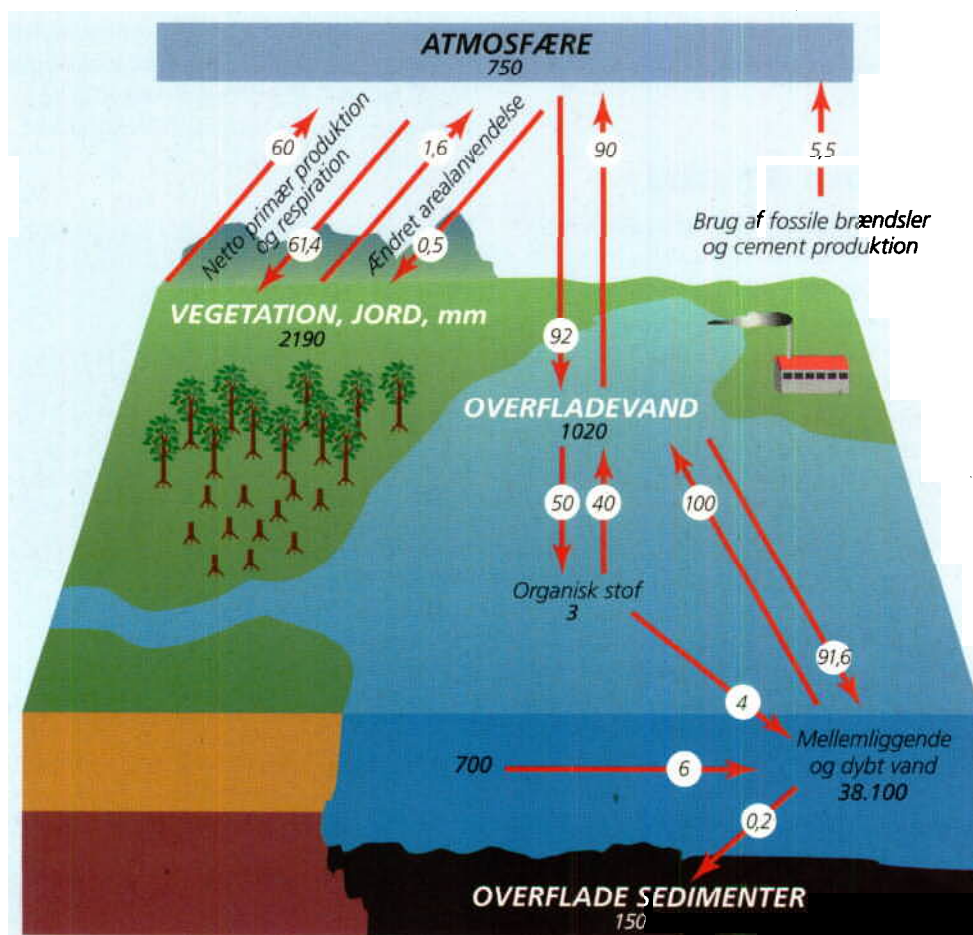
I praksis er det hele langt mere kompliceret, fordi der er mange transportveje, og fordi stofferne kan omdannes undervejs. Det fremgår af det globale kulstofkredsløb (figuren herunder).

Luftforurenende stoffer, der i de allerfleste tilfælde består af ganske almindelige kemiske forbindelser, vil indgå i disse kredsløb og bevirke en forskydning i stoflige vægtene.



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

Forenklet fremstilling af det globale kulstofkredsløb. Tallene i cirklerne er transporter i Gigaton pr. år. Andre tal er kulstofindhold målt i Gigaton kulstof. 1 Gigaton er 1.000.000.000 ton.



Luftforurening består ganske enkelt i, at nogle stoffer optræder i generende koncentrationer på ubekvemme steder. I den simple model svarer luftforurening fra menneskelige aktiviteter til, at pumpen kører hurtigere, og at der derfor kommer mere væske i den øverste beholder. I den virkelige verden er den geografiske udstrækning af denne forskydning (forureningen) bestemt af stoffernes omsætnings- og transporttid, der afgør, hvor langt de kan transporteres, før de igen fjernes fra atmosfæren. Resultatet af disse fjernelsesprocesser kan være, at der dannes nye (sekundære) luftforureninger. Ved afsætning kan stofferne også gå over som vand- eller jordforurening.

## Spredning af forurening

Spredningen i atmosfæren er til dels bestemt af omgivelserne. I et lukket rum er der ingen spredning, mellem to husrækker (figur) er den ringe, og i et åbent, fladt landskab er den god. Afgørende er imidlertid også de meteorologiske forhold, specielt vinden.

I Europa påvirkes vinden af tre faktorer: Den store temperaturforskel mellem polarluften mod nord og den subtropiske luft i syd; fordelingen af land og hav, specielt med Atlanterhavet mod vest; og endelig de forhindringer, som udgøres af de store bjergkæder, specielt Alperne.

I det meste af Europa er der en dominerende vind fra vest; det betyder, at forureningen fortrinsvis blæser mod øst. Mange forurenende stoffer (fx svovl- og kvælstof forbindelser) har omsætnings-tider af størrelsesordenen i dage og kan spredes over områder som hele Europa (side 24).

Andre stoffer (fx kuldioxid) bliver i atmosfæren i mange år og kan spredes over hele kloden. Samtidig betyder den lange levetid, at der kan opbygges store koncentrationsændringer. Selvom de menneskeskabte

kuldioxidudslip, kun udgør få procent af de naturlige stofstrømme, kan de over en årrække få drastiske konsekvenser for klimaet (side 48).

## Modelberegninger

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

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

Man kan også beregne, hvordan forureningen var i gamle dage. Det er selvfølgelig noget mere usikkert, fordi input-dataene, der normalt baseres på brændsels- og råstof-regnskaber, er mangelfulde, og fordi der sjældent er mulighed for at kontrollere, om man har regnet rigtigt. Det er også normalt nødvendigt at benytte nutidige meteorologiske data. Men man får alligevel et vist indtryk af forholdene.

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

Forureningens spredning i et lukket gaderum er ringe.



## Forureningstyper

Den væsentligste årsag til luftforurening er anvendelsen af fossile brændsler, dvs. kul, olie og gas. Den såkaldt *primære* luftforurening kan her opstå på forskellig vis:

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

Fra andre kilder, typisk industrielle aktiviteter, kommer ofte stoffer af samme type, men i andre blandingsforhold fx relativt mere kulbrinter. Fra landbrugsaktiviteter kommer bl.a. ammoniak, metan og lattergas.

Efter udsendelsen kan de primære forureninger reagere i atmosfæren og danne *sekundære* forureninger; størst betydning har den fotokemiske luftforurening, der dannes når kulbrinter og kvælstofoxider reagerer under indvirkning af sollys (side 36-37).

## Væksten i det samlede udslip

Groft taget og populært sagt bestemmes de samlede luftforureningsudslip af tre faktorer: Antallet af mennesker, deres materielle levestandard og den anvendte teknologi. Der er imidlertid ikke nødvendigvis nogen simpel sammenhæng mellem forureningsudslippet og det resulterende forureningsniveau et givet sted; det afhænger helt af mulighederne for spredning.

Der er i princippet ikke noget galt i at nedsætte det lokale forureningsniveau ved at sprede forureningen, hvis de naturlige stofkredsløb kan følge med. Problemet er blot, at den globale vækst efterhånden har medført udslip, der overbelaster de naturlige rensningsmekanismer helt op på globalt plan.

*Verdens befolkning* (figur øverst) var for nogle hundrede år siden under en halv milliard. Omkring år 1900 var den under 2 milliarder; men nu er den over 5, og i midten af næste århundrede vil den efter al sandsynlighed være omkring 10 milliarder.

Siden 2. Verdenskrig er *det globale energiforbrug* (figur i midten) steget med næsten en faktor 5. Da størstedelen af denne energi er blevet fremstillet ved afbrænding af fossile brændsler og mindre mængder biobrændsler uden røggasrensning, har det betydet, at luftforureningen, globalt set, er steget tilsvarende. For Danmark har udviklingen stort set fulgt samme mønster, indtil der omkring 1970 skete en opbremsning.

*Verdens industriproduktion* er steget med en faktor 10 siden afslutningen af 2. Verdenskrig.

*Det globale udslip af kuldioxid* (figur nederst) er steget stort set i takt med anvendelsen af fossile brændsler. Det har, sammen med mindre bidrag fra bl.a. skovrydninger, medført at atmosfærens indhold af kuldioxid (side 48-49) nu er omkring 30% højere, end det var før begyndelsen af industrialiseringen.

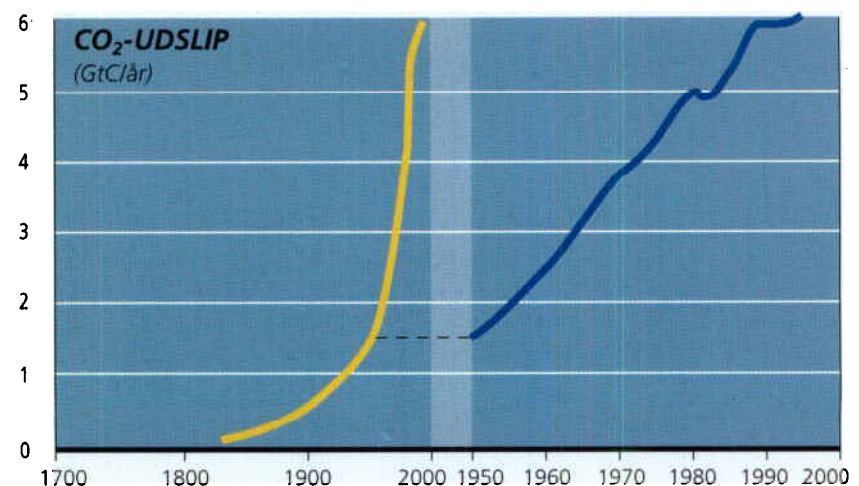
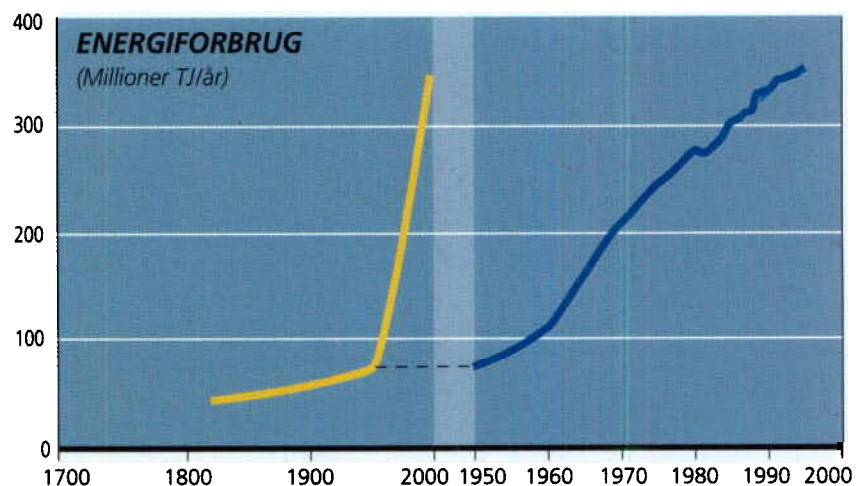
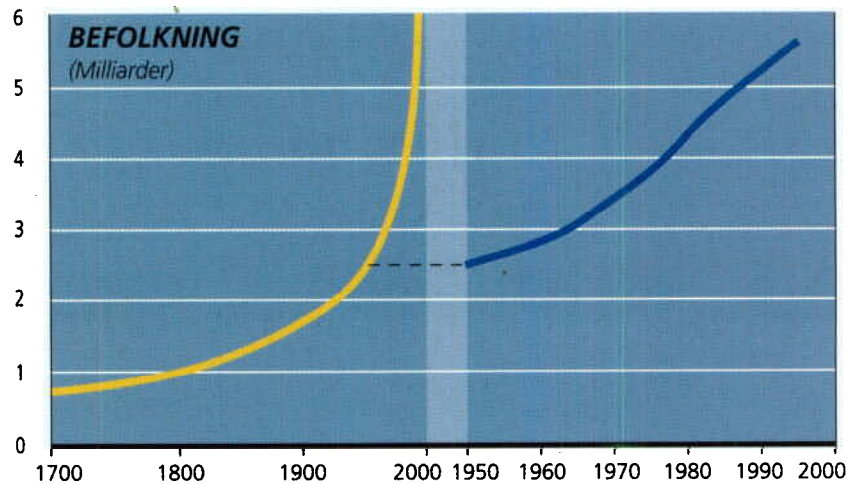
Ser man nøjere på de tal, som ligger bag de udjævnede kurver, kan man lige ane virkningerne af de to verdenskrige, energikrisen, en hungersnød i Kina med 100 millioner døde og nu senest sammenbruddet i Østeuropa. Men globalt set er væksten fortsat.

## Fremtidens forurening

En vurdering af den fremtidige luftforurening og dens virkninger må baseres på antagelser om udviklingen i befolkningstal, økonomi og teknologi. Ofte opstiller man såkaldte scenarier, der ikke må opfattes som prognoser, men kun som det, der ligger i ordet, "scenebilleder" af mulige fremtidige situationer. Det er derfor også muligt at opstille flere forskellige scenarier.

I forbindelse med vurderinger af fremtidige klimaændringer rækker scenarierne typisk 100 år frem i tiden. Og det er, når det gælder teknologisk udvikling, *meget lang tid*. I sine erindringer fra "Det glade København" fortæller journalisten og forfatteren Carl Muusman om et foredrag i Industriforeningen omkring år 1900. Taleren ventede ingen større teknologiske landvindinger, for "det nye Aarhundrede vil i det store og hele på det tekniske Område udnytte, forbedre og fuldkommengøre det gamle Aarhundredes Opfindelser, samtidigt med at det vil sætte hele sin overskydende Kraft ind på det sociale og kulturelle Udviklingsarbejde i Fredens og Fremskridtets Tjeneste". Talen blev efter sigende hilst med stærkt bifald, men hvem turde sige noget lignende i år 2000?

*Udviklingen i verdens befolkning, energiforbrug og udslip af kuldioxid (regnet som kulstof) fra energisektoren. Bemærk at perioden siden 1950 er vist mere detaljeret. (De to nederste figurer er beregnet af Jørgen Fenhann, Risø på basis af FN's energistatistik og IPCC's emissionsfaktorer).*



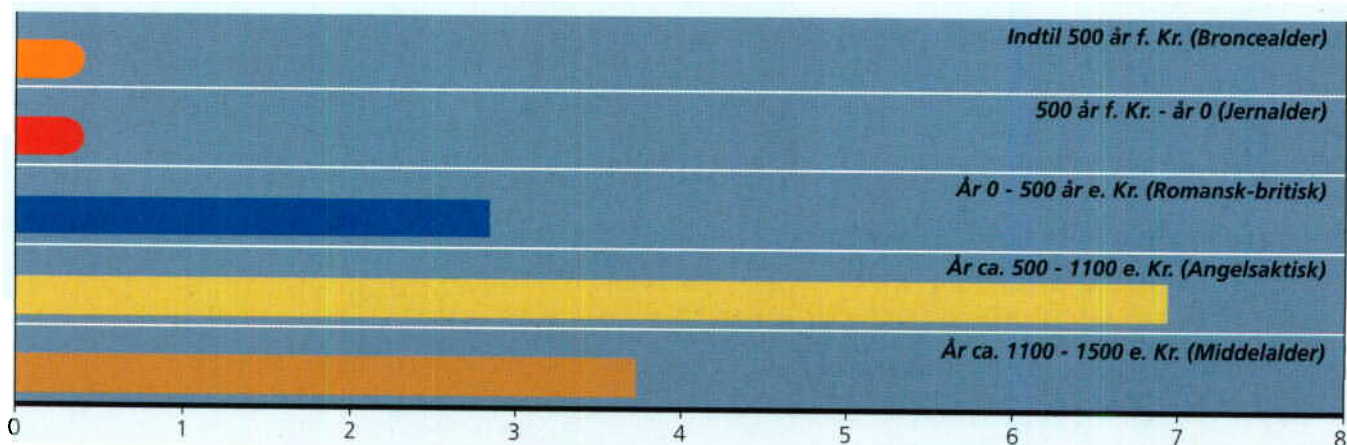
# Det forurenede England

Det danske ord "forurening" er temmelig blodfattigt og af relativt ny dato. Så er der mere stil over det engelske "pollution", der er afledt af det latinske "polluo" med betydningen tilsmudser, besudler, vanhelliger og krænker.

liora „af hvem man havde ventet sig ngt bedre“.  
**pollicitati**o -ōnis f 3 (pollicitor) et løfte.  
**pollicitor** 1 dep (polliceor) løver.  
**polluo** 3 tilsmudser, besudler; || vanhelliger, krænker;  
heraf: -**ūtus** adj ukysk, lastefuld.  
\***pólus** m 2 pol, (spec) nordpolen; || himmelhvælvet.  
**pólypus** m 2 (græ) blæksprutte; || rougrisk person.  
**pómari**um n 2 (pomum) frugthave.

Men der har tilsyneladende også været langt mere forurenede i England. I en på én gang underholdende og saglig bog fra 1987 ("The big smoke") behandler den engelske miljøforsker Peter Brimblecombe luftforureningen. Specielt i London - fra begyndelsen og op til nu.

Hyppigheden i % af tegn på bihulebetændelse i kranier fra engelske begravelsespladser.  
(Efter Brimblecombe 1988).



## Luftforurening starter indendørs

Den alvorligste tidlige luftforurening har, helt klart været indendørs, hvad der næppe kan overraske nogen, der har set rekonstruktioner af hytter og huse med åbne ildsteder og aftræk i loftet.

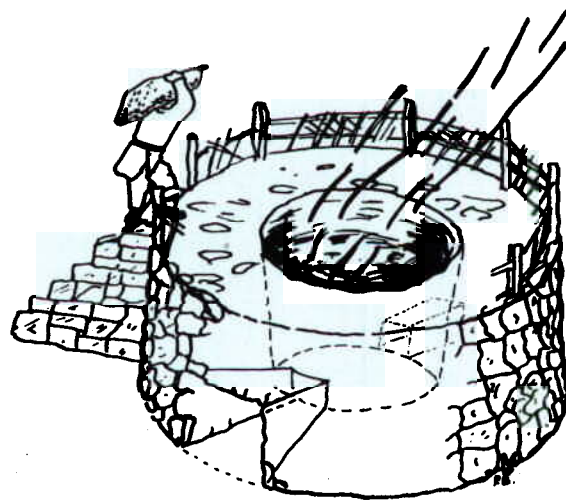
De tydeligste tegn på tidlig indendørs luftforurening kan ses i lungevæv fra nedfrosne, indtørrede eller mumificerede lig fra forskellige steder i verden. Sorte lunger synes at have været reglen snarere end undtagelsen, og deres tilstand må have mindet om lungerne hos kulminearbejdere i forrige århundrede.

I England har man bl.a. undersøgt kranier fra førindustrielle begravelsespladser og registreret hyppigheden af bihulebetændelse, der i alvorlige tilfælde kan angribe knoglerne. Man har her fundet en særlig stor hyppighed i tiden op til år 1000, dvs. før den såkaldte middelaldervarme sætter ind, og i en periode hvor folk antagelig var mere inde, fyrede mere og luftede mindre ud (figur).

Kalkbrænding var en væsentlig kilde til luftforurening i middelalderen. Oprindeligt blev der fyret med træ, men i midten af det 13'ende århundrede gik man over til kul, med stigende svovlforurening som resultat.

## Tidlig byforurening

Senere har man bl.a. undersøgt over 2000 skeletter fra et industrikvarter i York og omliggende landområder. Det viste sig, at 58% af dem, der havde været begravet i byen mellem år 1000 og 1600, havde haft bihulebetændelse. Her har man specielt mistanke til et kalkbrænderi, der blev anlagt i det 13'ende århundrede i forbindelse med bygningen af byens store katedral.

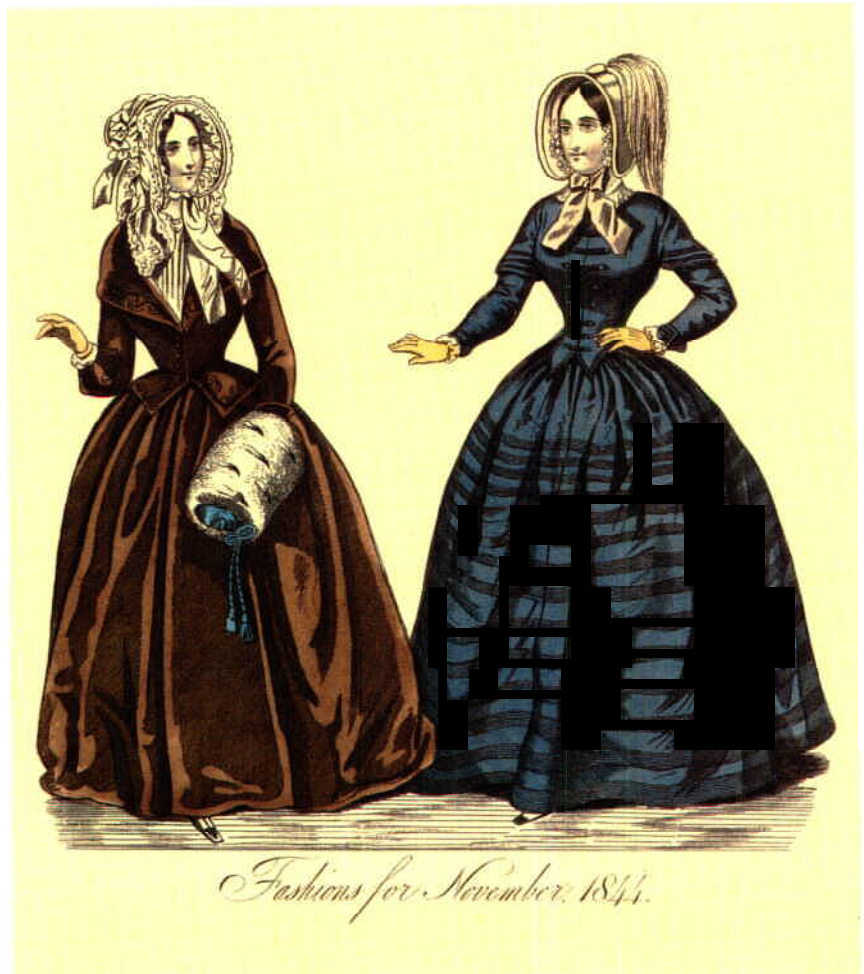


## Indirekte oplysninger fra mange kilder

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

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

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



# London smoggen

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

## Skader på sundhed og materialer

I midten af det syttende århundrede sker der en kraftig stigning i antallet af dødsfald som følge af den såkaldte engelske syge, der muligvis har forbindelse med reduktionen af sollys som følge af det næsten konstant tågede vejr om vinteren. Samtidig konstaterede man en kraftig nedbrydning af bygninger og kunstværker. I 1661 skriver John Evelyn således, at byluften *"angriber jernbjælker og de hårdeste sten med de gennemtrængende og bitre gasser, som følger med dens svovl, og giver mere skade på et år end den rene luft på landet kan forårsage på flere hundrede"*.

*John Evelyn's engelske tekst fra 1661.*

**This is that pernicious Smoake which fullyes all her Glory, superinducing a footy Crust or Furr upon all that it lights, spoyling the moveables, tarnishing the Plate, Gildings and Furniture, and corroding the very Iron-bars and hardest Stones with those piercing and acrimonious Spirits which accompany its Sulphure; and executing more in one year, than expofed to the pure Aer of the Country it could effect in some hundreds.**

## Tågen i kriminallitteraturen

Den berygtede London-tåge bliver et vigtigt element i den tidlige kriminalroman som fx i *Dr. Jekyll og Mr. Hyde*, hvor man kan læse: *"Klokken var efterhånden blevet ni, og det var tåge - årets første rigtige tåge ... Medens drosken sneglede sig fra gade til gade, så sagfører Utterson en vidunderlig mængde af grader og afskygninger af halvlys; for et sted var det så mørkt som langt ud på aftenen osv. osv."*

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

## Industriforurening og "The Alkali Act"

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

I 1863 vedtog parlamentet den såkaldte "Alkali Act" og R.A. Smith blev ansat som den første "General Inspector of Alkali Works for the Government" - en art direktør for miljøstyrelsen. Foruden sit administrative arbejde var Smith aktivt engageret i videnskabeligt arbejde, som kulmine-rede med offentliggørelsen af de første direkte målinger i en nu klassisk bog "Air and Rain" fra 1872.

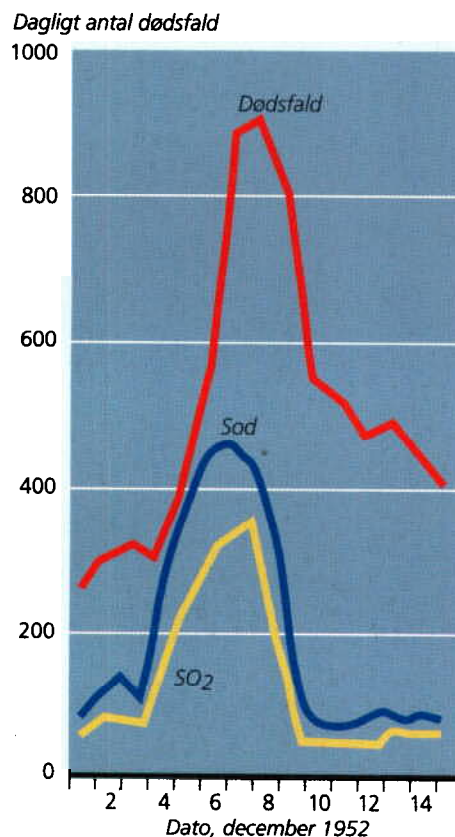


## Modelberegninger

Foreløbig var der dog ikke tale om egentlige bymålinger, men det er muligt at få kvantitative oplysninger ved hjælp af modelberegninger baseret på brændselsforbrug. Det viser sig, at det generelle niveau for svovldioxid i London allerede omkring år 1700 må have været oppe på 150 mikrogram per kubikmeter, og at det først begyndte at falde efter år 1900. Man skal være meget varsom med at sammenligne målinger i forskellige byer, men umiddelbart er dette mere end 10 gange så meget, som vi måler i Københavns centrum i dag. I Londons centrum har man helt op til midten af 1960'erne målt årsmiddelværdier omkring 300 mikrogram per kubikmeter.

## “Smog-episoder” og “The Clean Air Act”

Ét er imidlertid langtidsmiddelværdier, noget helt andet er de spidsbelastninger, som kunne optræde under de berygtede “smog-episoder”; her blev niveauerne under specielle vejrforhold op til 20 gange højere, og de kunne medføre en overdødelighed på flere hundrede mennesker om dagen. Først efter et par katastrofale episoder efter 2. Verdenskrig (figur) blev der gennemført en lovgivning (The Clean Air Act), som har gjort London til en by, der i hvert fald ikke er værre end så mange andre europæiske storbyer. I dag skal man til byer som Mexico City eller Cairo for at se problemer, der bare minder om noget i den gamle størrelsesorden.



Ved en berygtet smogepisode i London december 1952 var sigtbarheden reduceret til få meter. Forureningsniveauet nåede op omkring 100 gange det, man typisk ser i København. I flere dage var dødeligheden tre gange over det normale. Det gav stødet til den senere “Clean Air Act”.

Dødshyppigheden i London under den berygtede smog-episode i december 1952. Til sammenligning er, i lidt forskellig målestok, vist variationen i døgnmiddelværdierne for svovldioxid og sod. Maksimumværdierne er knap 2 mg/m<sup>3</sup> eller 10-20 gange så meget som de største værdier vi i dag registrerer i Københavns centrum.

# København i Guldalderen

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

## Forpestet Luft.

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

Myndighedernes indsats synes ikke at imponere forfatteren til denne artikel i "Politivennen" 1841.

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

Ved en simpel, overslagsmæssig modelberegning af luftforureningen går man ud fra, at alt indført brændsel er blevet anvendt til rumopvarmning, og man fordeler derfor udslippene efter bebyggelsen. (Beregningerne er udført af Per Løjstrøm, DMU).

## Foreløbige modelberegninger

For at belyse spørgsmålet har DMU foretaget nogle enkle beregninger af luftforureningen i København omkring 1850. Tidspunktet er ikke valgt helt tilfældigt. Man er begyndt at foretage opgørelser af brændselsforbrug (af toldmæssige grunde selvfølgelig) og vi ved derfor nogenlunde, hvor stort forureningsudslippet kan have været. Desuden ligger byen med sine omkring 130.000 indbyggere endnu i alt væsentligt inden for voldene, og vi ved derfor også, hvor forureningsudslippet sker (figur). Hertil kommer, at industrien stadig er beskeden, og at man endnu ikke har fået gas; det sker først i 1857. Alt i alt en regnemæssigt håndterlig situation.

Det generelle niveau af svovldioxidforureningen synes, i byens centrum, at have været omkring 10 gange højere end det er nu, og dermed måske noget, der minder om det halve af det, der var i London på samme tid. Da København også dengang var langt mindre end London, og vejrforholdene er gunstigere, har byen endvidere altid været forskånet for de store spidsbelastninger under forureningsepisoder.

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

Luftforureningen i København har altså været anderledes sammensat, end den er i dag, men luften har bestemt ikke været sundere - og umiddelbart langt ubehageligere.

## Byens vækst

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

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

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



Gadebillede fra København i midten af 1800-tallet. Luftforureningen har ikke været det eneste miljøproblem. (Tegning af C.N.M. Klæstrup).

# Problemer og løsninger

*Saly's ryttermonument for Frederik V på Amalienborg Slotsplads i København, fotograferet i 1982.*

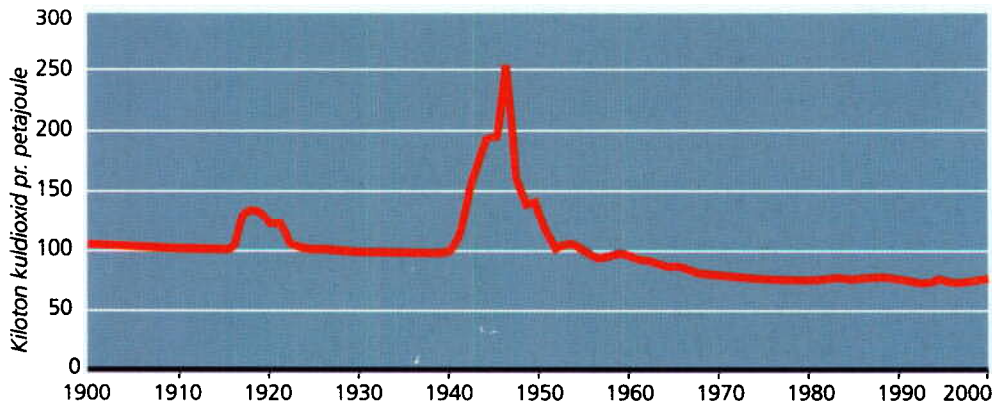
Hvordan er det så senere gået med luften i København? Ser vi på det samlede danske udslip af svovldioxid (side 31), var det i slutningen af forrige århundrede omkring 25.000 tons om året, det toppede omkring 1970 med ca. 500.000 og er nu som følge af internationale aftaler og en række indgreb nede på omkring 150.000 tons om året. Det antyder selvfølgelig nogle tendenser, men det siger ikke nok, når det gælder lokal forurening; her er det også et spørgsmål om kildernes tæthed, skorstenenes højde o.m.a.

## Materialeskader

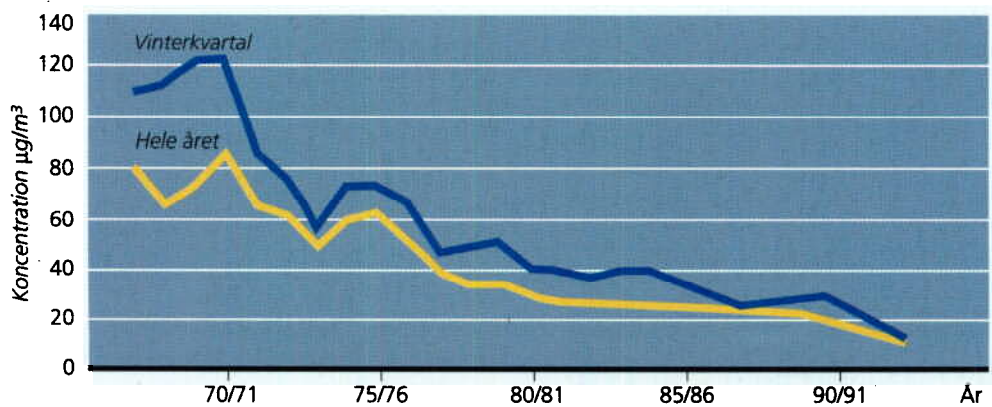
Igen kan man støtte sig til indirekte oplysninger. Måske det mest åbenlyse tegn på luftforurening er nedbrydningen af materialer, der er dokumenteret med fotografier siden slutningen af forrige århundrede.

Temperatursvingninger, frostsprængninger, svampeangreb og andre naturlige fænomener vil altid bevirke, at materialer nedbrydes, men nogle forurenende stoffer fremmer processen. Det alvorligste er byluftens svovldioxid, der angriber både metaller og sten - i særdeleshed hvis de er fugtige. Værst går det ud over kulturgenstande, hvor værdien kan ligge i et tyndt overfladelag. Særligt udsatte er de historiske bygningers ornamenter, der ofte er udført i en blød sandsten. Stenen omdannes til gips, som vaskes af med regn. Hvis stenen er porøs, kan der endvidere i dens indre dannes salte, som udvider sig og forårsager sprængninger.

Også bronzestatuer angribes, og dækkes efterhånden af et lag af basisk kobbersulfat; i modsætning til ir (kobberkarbonat) beskytter det ikke mod videre angreb. Figuren viser Saly's ryttermonument for Frederik V på Amalienborg Slotsplads. Det blev opstillet i 1770 og er her fotograferet i 1982. Monumentet havde 50 år tidligere endnu den originale bronzeoverflade med tydelige værktøjsspor, men den er nu kun tilbage på hestens bug. De væsentligste angreb synes altså at være sket i de senere år, og man kan deraf slutte, at forureningsniveauet har været relativt højt op mod 2. Verdenskrig før der blev udført egentlige målinger.



Forholdet mellem dansk udslip af kuldioxid og den producerede bruttoenergi. Man bemærker stigningen under 1. og i særdeleshed 2. Verdenskrig. (Data sammenstillet af Erik Runge, DMU).



I København var forureningen med svovldioxid omkring 1970 som årsmiddel ca. 80 µg/m<sup>3</sup> og om vinteren oppe på 120 µg/m<sup>3</sup>. I dag er den reduceret til en tiendedel og dermed langt under Verdenssundhedsorganisationen (WHO's) vejledende grænseværdi på 50 µg/m<sup>3</sup>.

### Tidlige målinger

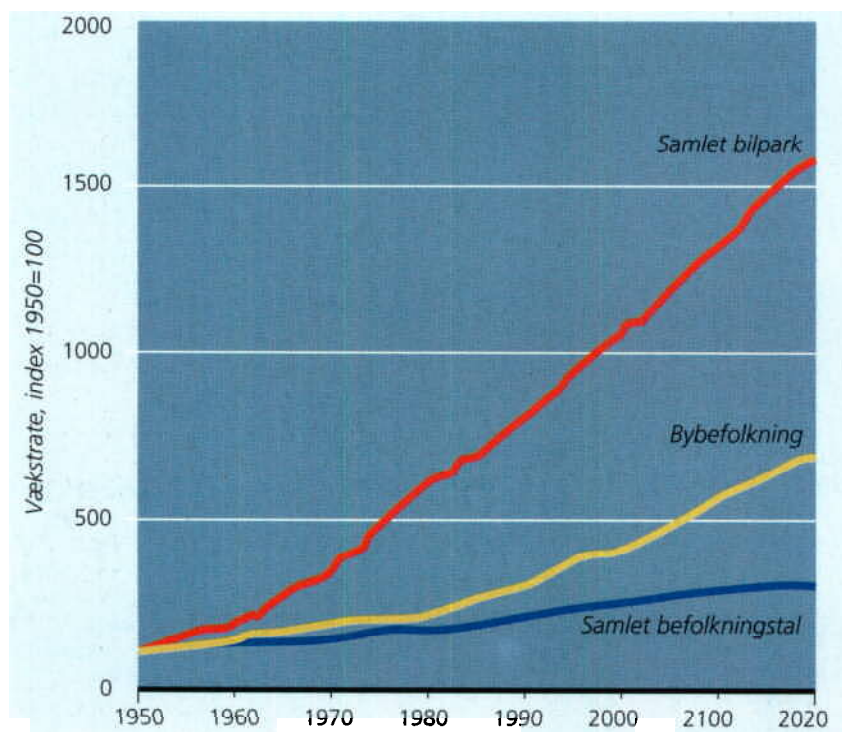
I midten af 1940'erne undersøgte en komité nedsat af Akademiet for de tekniske Videnskaber "den atmosfæriske forurening som følge af den stigende industrialisering". Resultaterne kan ikke umiddelbart sammenlignes med moderne målinger, men viste tilsyneladende, at København i visse henseender var mere forurenede end London. Utvivlsomt hang det sammen med den unormale situation i slutningen af - og umiddelbart efter - 2. Verdenskrig med brug af store mængder brunkul og tørv. Senere opgørelser af det danske udslip af kuldioxid per produceret energimængde har vist, at det i krigsårene steg til mere end det dobbelte (figur øverst). Noget tilsvarende må formodes at have været tilfældet for svovldioxid og støv.

### Systematiske målinger

Vi har først systematiske danske målinger fra slutningen af 1960'erne og specielt efter etableringen af det landsdækkende luftkvalitetsmåleprogram (LMP) i begyndelsen af 1980'erne. Den længste tidsserie findes for svovldioxid (figur nederst), hvis årsmiddelværdi i Københavns centrum er faldet støt fra omkring 80 mikrogram per kubikmeter i midten af 1960'erne til nu at ligge under 15. Det skyldes dels lovgivning om begrænsning af svovl i brændsler, dels en ændring i fyringsteknik herunder en overgang til fjernvarme, hvor store anlæg med høje skorstene spreder forureningen ud af byen.

Forureningen med partikler er faldet tilsvarende, dog med en mindre stigning i begyndelsen af 1980'erne, som kan hænge sammen med øget brug af kul.

# Den moderne storby



Anslået og forventet relativ vækst i verdens befolkning, urbanisering og bilpark i perioden 1950-2020. (Efter: UNEP, WHO 1992).

Alene siden 1950 er verdens befolkning mere end fordoblet, andelen af personer, der lever i byer er blevet 4 gange større, og den globale bilpark er blevet ca. 10 gange større. Denne udvikling forventes at accelerere i de kommende år (figur), og de Forenede Nationer anslår, at i år 2000 vil 47% af verdens befolkning bo i byområder.

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

## Situationen i København

Luftforureningen i København er i visse henseender kommet under kontrol, men den har samtidig i de senere år skiftet karakter. Den skyldes nu, som i andre industrialiserede lande, i højere grad den stigende biltrafik, der i byområder er den dominerende kilde til kvælstofoxider, kulilte og kulbrinter. Udslippet af disse tre forureninger kan reduceres stærkt med anvendelse af katalysatorer, der i Danmark er lovpligtige på alle benzinbiler indregistreret efter 1990. Virkningen er dog endnu beskeden, bl.a. fordi den modvirkes af en stigende trafikmængde. En vekselvirkning med langtransporteret ozon (side 36-37) kan også have betydning.

Den oprindelige blyforurening er, som i de andre vestlige landes byer, derimod faldet drastisk med udfasningen af blyadditiver i motorbenzin, der dels er gennemført, fordi bly er giftig i sig selv, dels fordi bly ødelægger katalysatorer (figur nederst th.)

Fjernelsen af bly fra benzin har dog ikke været helt uden bivirkninger, idet man i første omgang har søgt at opretholde benzins oktantal ved at forøge indholdet af aromatiske kulbrinter.

I trafikerede gader er der målt benzen-niveauer over  $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (en grænseværdi som forventes fastsat i EU). Også andre organiske forbindelser er blevet påvist. Nogle vides at være kræftfremkaldende; det gælder foruden benzen mange PAH'er (polyaromatiske kulbrinter). Desværre har man ikke målinger i tidsserier af disse stoffer og kan derfor endnu ikke vurdere udviklingen; mange stoffer har sikkert altid været i byluften bl.a. pga. fyring med

brænde. Det samme gælder forurening med sodpartikler, der nu fortrinsvis kommer fra dieslbiler, og som formodes at have en væsentlig sundhedsmæssig virkning - enten i sig selv eller fordi de kan være bærere af tungtflygtige forbindelser.

Den sekundære forurening ozon, der beskrives nærmere side 34-39, kan være et alvorligt byproblem i sydlige lande, men er det ikke i Danmark.

## Udviklingen i Europa

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

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

## Den store verden

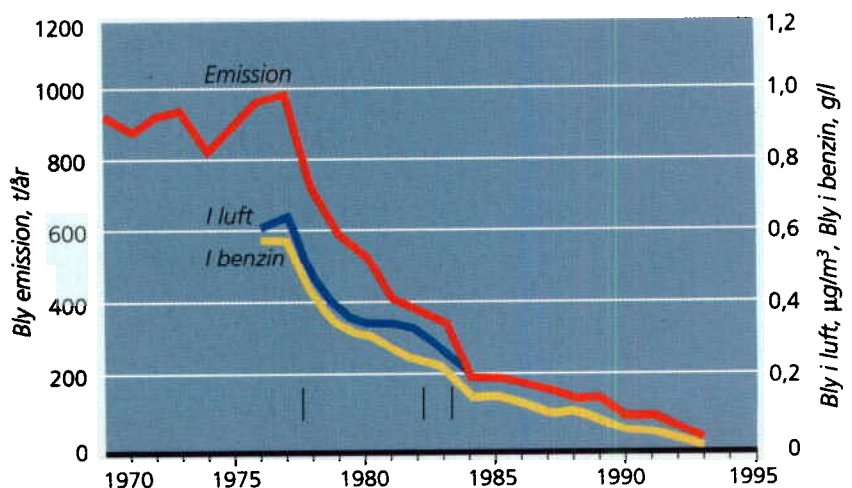
Med sin befolkning på omkring 1 million er København, på verdensplan, en relativt lille by med håndterlige problemer. I følge UNEP/WHO (1992) har 69 byområder befolkninger over 3 millioner og op til ca. 20 millioner. I år 2000 vil verdens største by være Mexico City med over 24 millioner indbyggere.

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

Samtidigt med at skorstenene på fyringsanlæg er blevet højere, er der kommet flere biler.  
(Foto: Jes Fenger)



Koncentrationen af bly i Københavns luft er faldet til under 1/10 i løbet af de sidste 20 år. Det skyldes udfasningen af blyadditiver i motorbenzin. I Danmark skyldes blyforurening af luften nu i alt væsentligt fjernttransport fra udenlandske industriområder.



# Forurening uden grænser

Med høje skorstene kan man sprede forureningen fra stationære kilder som kraftværker og varmecentraler og dermed forbedre den lokale luftkvalitet. Men forureningen bliver selvfølgelig ikke uden videre væk blot ved at blive spredt. De første forsøg på at løse byernes problemer, gav derfor blot problemer i større geografisk skala.

Siden forrige århundrede har det været kendt, at luftforurening kan transporteres over lange afstande. Men det var først i slutningen af 1960'erne, at fænomenet fik større videnskabelig og politisk interesse. Det egentlige gennembrud kom med FN's

Miljøkonference i 1972, senere fulgt op med Stockholmkonferencen "Förurning i dag och i morgon" i 1982.

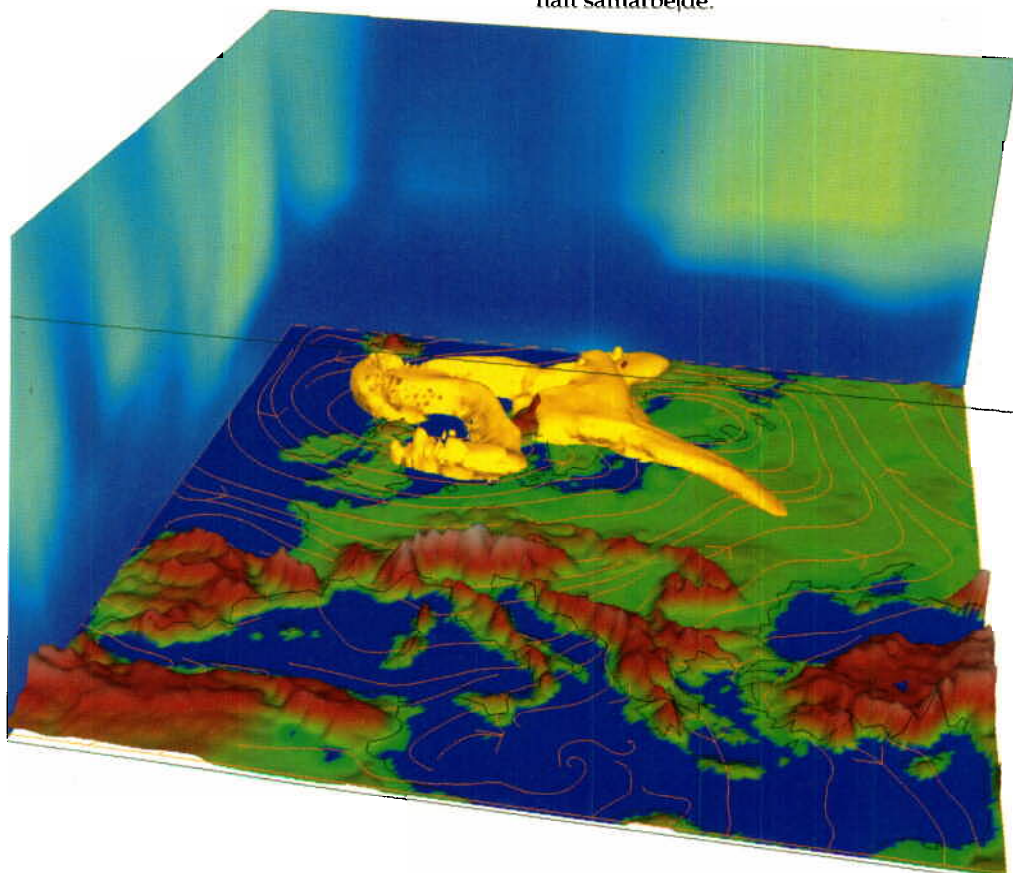
## Modelberegninger af langtransport

Med en typisk vindhastighed på 5-6 m/s er der tale om afstande på ca. 500 km per døgn. Da mange luftforurenende stoffer har midlelevetider i atmosfæren af størrelsesordenen nogle dage, kan de derfor transporteres over områder som hele Europa, hvor alle lande kan forurene hinanden (figur). Derfor kan problemerne kun løses i et internationalt samarbejde.

*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 nord styret af et lavtryk over Færøerne. En del af forureningen spredes mod øst og når efter tre døgn Ukraine. (Beregning foretaget af Jørgen Brandt, DMU).*

*Den anvendte model beregner kun spredning. I praksis vil røgfanen udtyndes, efterhånden som forureningen afsættes på jordoverfladen - enten direkte eller via nedbør.*

*Man kan på denne måde også beskrive, hvordan radioaktive stoffer, der jo også er en form for luftforurening, udbredes.*





## EMEP

I 1977 etableredes det såkaldte EMEP måleprogram (European Monitoring and Evaluation Programme) som teknisk videnskabelig baggrund for UN-ECE's (United Nations Economic Commission for Europe) forhandlinger om grænseoverskridende forurening. I EMEP opgøres forureningsudslip i rudenet på 150x150 eller 50x50 km, og man beregner med spredningsmodeller, hvor den udsendte forurening afsættes.

## Danmarks rolle

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. Groft taget "eksporterer" Danmark dobbelt så meget luftforurening, som vi "importerer" (tabel). En yderligere fordel er, at Danmark er opdelt af havområder og derfor har en mindre kildetæthed end mange andre lande. På den anden side vil en del forurening netop afsættes i indre vandområder, hvor fx luftbåren kvælstofforurening bidrager med omkring 30% af den totale kvælstofbelastning. Luftforurening bliver dermed en vigtig faktor i det meget omtalte iltsvind med efterfølgende fiskedød.

Land	Import	Eksport
Tyskland	90	24
Storbritannien	80	3
Polen	43	33
Tjekkoslaviet	22	2
Sverige	2	73
Norge	1	24
Finland	0	10

Forurening	Import	Eksport
SO <sub>2</sub> - sulfat	336 - 84%	715 - 92%
NO <sub>2</sub> - nitrat	177 - 89%	805 - 97%
Ammoniak	91 - 18%	634 - 61%

*Selvom alle lande i princippet forurener hos hinanden, er der afgjort vindere og tabere.  
Tegning fra EF-bladet Euroforum.*

*Nogle eksempler på Danmarks "import" og "eksport" af svovlforurening i 1994.  
Enhed: 100 tons svovl.  
Virningen af den fremherskende vestenvind er tydelig. Vi modtager forurening fra England og sender selv forurening til Sverige.*

*Danmarks samlede import og eksport af afsat forurening i 1994. Angivet i 100 tons og i % af henholdsvis afsætning og udslip. Det er kun en lille del af forureningen med de relativt langlivede oxiderede svovl- og kvælstofforbindelser, der afsættes inden for landets grænser. Ammoniak (og andre reducerede kvælstofforbindelser) har derimod kort rækkevidde.*

# Syreregnen

*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 er væsentligt lavere værdier (svarende til større surhed) i de stærkest forurenede områder. Af regnetekniske grunde er kortet drejet.*  
(Efter EMEP/CCC-Report 4/96).

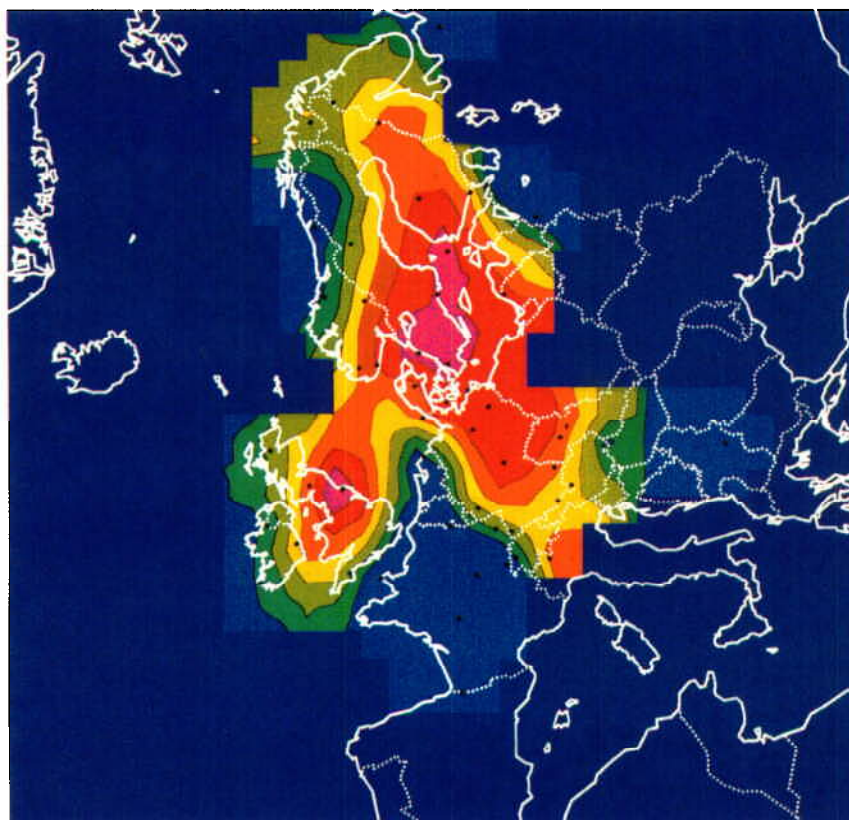
Selv før menneskene begyndte at forurene atmosfæren var nedbøren ikke neutral, men svagt sur; antagelig med et pH omkring 5,5. Det skyldes, at luften altid har indeholdt naturligt forekommende, forsurende stoffer, bl.a. fra vulkanudbrud. En forsurening af nedbøren omkring større industrier blev først beskrevet af A.R. Smith i 1872 (side 16-17). I dag er fænomenet udbredt og rammer på grund af langtransport ikke kun industrialiserede områder. I store områder i det nordlige Europa er nedbørens pH nede omkring 4,5, dvs. den indeholder 10 gange så mange brintioner som "naturlig" nedbør (figur).

## 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 begyndte at vokse allerede i midten af forrige århundrede 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, og 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.

Umiddelbart vil ammoniak neutralisere syrerne i atmosfæren ved at danne ammoniumsalte, hvorved nedbøren i første omgang bliver mindre sur. Efter at saltene er blevet afsat i økosystemer, vil ammoniumionerne imidlertid gennem en række reaktioner, der involverer optag i planter, kunne frigøre brintioner. Herved giver ammoniakforureningen på længere sigt et bidrag til forsureningen i jorden, der er væsentligere end bidraget fra kvælstofoxider og sammenligneligt med bidraget fra svovldioxid.



*pH-værdier*

Over 5.00
4.90 - 5.00
4.80 - 4.90
4.70 - 4.80
4.60 - 4.70
4.50 - 4.60
Under 4.50

## Forsuring af ferskvand

Når den sure nedbør ender i søer, enten direkte eller via afstrømning fra det omgivende land, kan konsekvenserne være vidt forskellige afhængigt af jordbundsforholdene. I kalkrige områder vil søerne indeholde bicarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ), 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 livet er delvist eller helt uddødt (figur). Det er dog ikke helt afklaret i hvilket omfang årsagen er den umiddelbare forsuring. En medvirkende årsag kan være den udvaskning fra jorden af giftige metaller (bl.a. aluminium), der forøges, når vandet bliver mere surt.

## Jordforsuring

De øverste jordlag påvirkes hele tiden af vegetationen, der vokser. Det gælder i særdeleshed i Skandinavien, hvor jorden startede fra en hel steril tilstand efter sidste istid. En væsentlig effekt er en naturlig forsuring, der bl.a. påvirkes af skovbrug, hvor næringsstoffer ikke føres tilbage til jorden. En vurdering af forureningens betydning for jordforsuring er derfor usikker - også fordi man ikke ved tilstrækkeligt om jordens tidligere tilstand. Det er dog åbenlyst, at det sure nedfald har haft en væsentlig forstærkende effekt på opløsning af metaller i jorden og derigennem har været en medvirkende årsag til den såkaldte "skovdød".

## Eutrofiering

Svovl- og i særdeleshed kvælstofforbindelser (herunder ammoniak) er ikke alene forureninger, men også plantenæringsstoffer.

Det betyder, at forureningen samtidig virker gødende. Herved bliver balancen mellem forskellige planters konkurrenceevne forrykket. På landjorden er bevaringsværdige naturområder som fx lyngheder følsomme i den forstand, at de kan blive omdannet til græsheder. Næringsfattige højmoser og fattigkær er meget følsomme i Danmark, og der sker en indvandring af fremmed vegetation.

I vandområder fører denne overgødsning, der også kan have andre årsager (bl.a. spildevand), til en algevækst, der senere kan medføre iltsvind og fiskedød. På længere sigt kan disse effekter blive et problem af samme omfang som forsuringen.

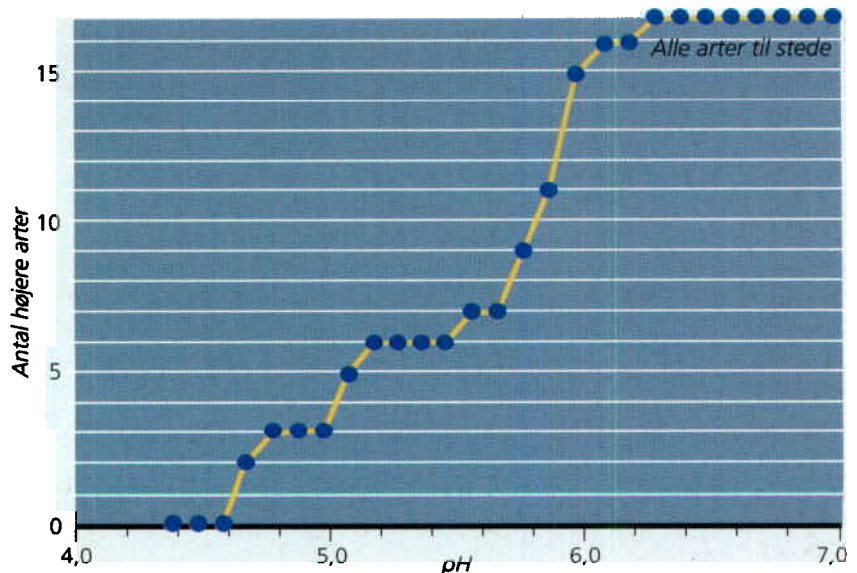
## Kritisk belastning

Som det fremgår, er forskellige økosystemer 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%.



Læs nærmere om kritisk belastning m.m. i Temarapport fra DMU 7/1997 om naturens tålegrænser for luftforurening.

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.



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 trædød og dårlig trivsel.



## 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 ("Neuartige Waldschäden"), 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 effekter og indirekte påvirkning gennem forsuring af nedbøren og jorden. Skovøkosystemer er imidlertid meget sammensatte, og der syntes ikke nogen steder at være tale om én klar årsag til de observerede svækkelser. Tværtimod vil en række forhold kunne spille sammen. Luftforureningens effekt kan bestå i, gennem længere tid, at svække træerne, og derved gøre dem mere følsomme over for fx tørke eller insektangreb.

I Centraleuropa synes hovedårsagen at være svovlforurening, medens det i USA snarere har været fotokemisk luftforurening (side 34-39). 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.

*Skovdød i Tjekkoslavakiet, 1988  
(Foto: Lennart Rasmussen).*

## En effekt på retur - i Europa

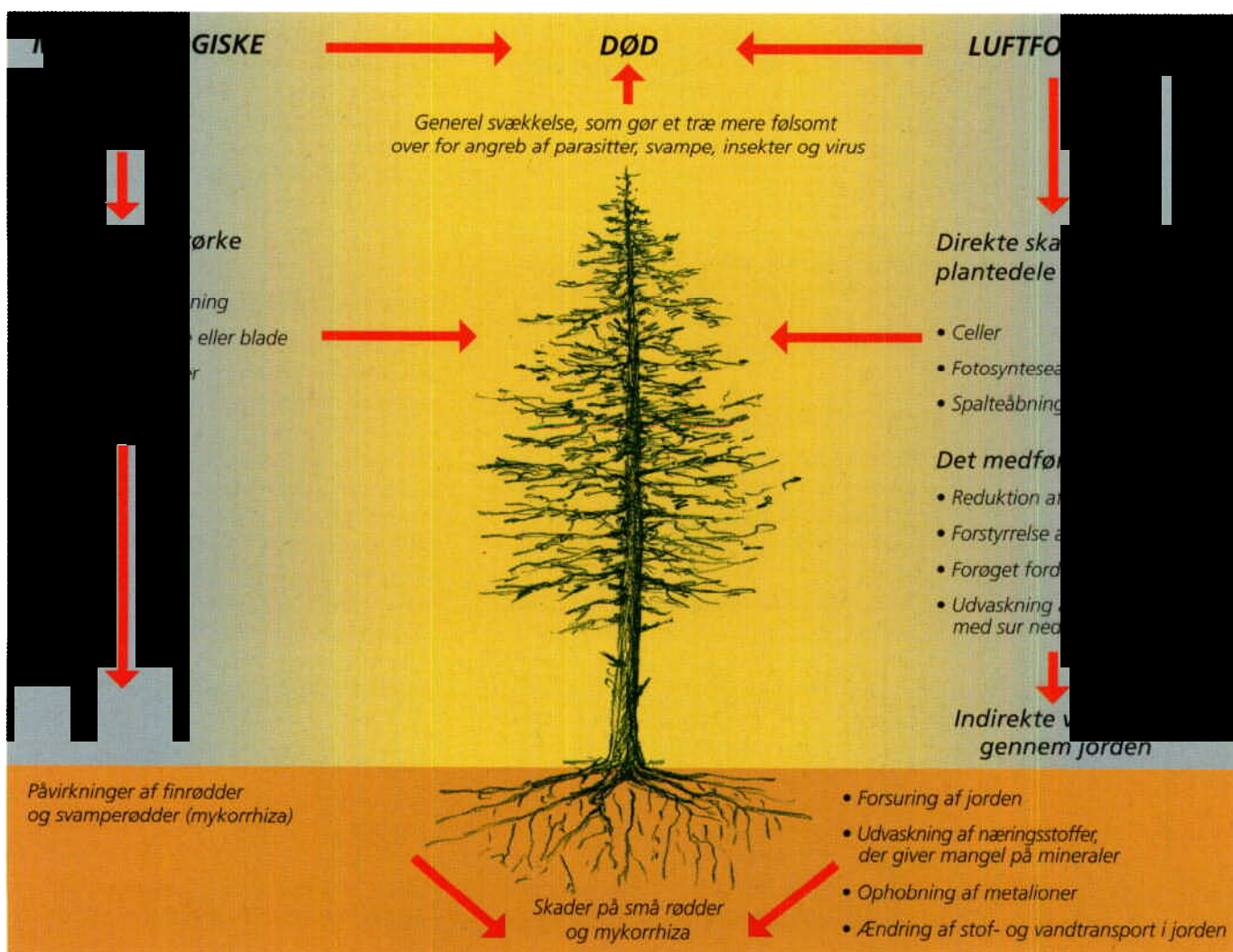
I Tyskland har man nu konstateret, at den hurtige udstrakte skovdød, som man frygtede i begyndelsen af 1980'erne, ikke er indtruffet. Forskellige skove har opført sig forskelligt, men generelt er der indtrådt en stabil situation. Der er også i Danmark observeret en generel forbedring af sundheden i nåleskovene.

Europæiske skove har gennem de sidste 20 år 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 sammen med reduktionen i udslip af svovlforurening (side 30-31).

Men ligesom storbyer i udviklingslandene bliver stigende forurenede, kan man nu forudse tilsvarende problemer med langtransport. Kinas voksende el-produktion, der fortrinsvis gennemføres med kulraft, vækker således bekymring for skader på skovene i det sydlige Japan.

*Skematisk fremstilling af de faktorer, som formodes at spille en rolle ved den såkaldte "skovdød". Hertil kommer, at træer, der ser ens ud, (ligesom fx mennesker), kan have forskellige arvelige anlæg, som gør, at de har forskellig følsomhed over for belastninger. Derfor kan det være vanskeligt i naturen at påvise konkrete årsagssammenhænge.*



# Bedre, men endnu ikke godt nok!

## Internationale aftaler

Forsuring som følge af luftforurening med svovl- og kvælstofforbindelser er et fænomen i international skala. Derfor skal problemerne også løses i et internationalt samarbejde. Det sker bl.a. i De Forenede Nationers Kommission for Europa (UN-ECE), 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.

På det seneste har EU erkendt alvoren i forureningsproblemet og udarbejder en sammenhængende strategi. Også hvad angår luftkvalitet er EU aktiv. I løbet af få år vil der komme nye/ændrede direktiver for i alt 13 luftforureningskomponenter.

## Historiske opgørelser af udslip

Som en del af det europæiske monitorings- og evalueringsprogram, har man på basis af historiske udslipsopgørelser beregnet svovlforureningen i Europa siden 1880.

I hele perioden sker de største udslip i et bælte, der strækker sig fra Midtengland over Ruhrdistriktet og ind i Centraleuropa, og det er selvfølgelig også her, forureningsniveauerne bliver størst. For det samlede Europa (figur, øverst) 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.

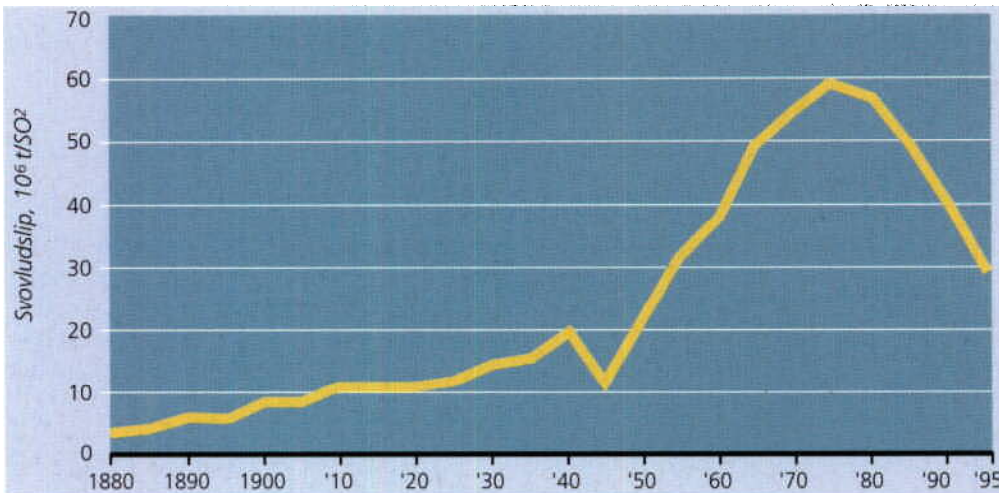
Udviklingen har ikke været helt den samme i de enkelte lande, og specielle forhold har gjort sig gældende i Østeuropa. I industrilandene Belgien, Tyskland og i særdeleshed England, var der væsentlige udslip allerede i forrige århundrede, men for de fleste andre lande, herunder Danmark (figur, midten) skete der ikke meget før 1. Verdenskrig. Det skal dog hertil bemærkes, at de officielt indberettede forureningsudslip ikke altid stemmer helt overens med (og undertiden 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 ton i 1860 til omkring 70 i 1980, før det igen begyndte at falde.

## Historisk svovlafsætning

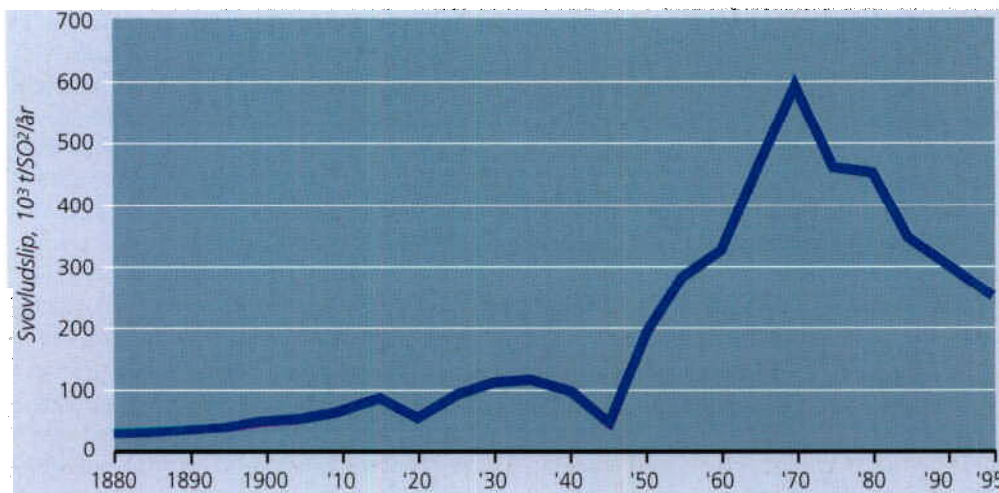
Ser man på et område i Sydsverige, hvor jorden er følsom over for forurening (figur, nederst), viser det sig, at den såkaldte kritiske belastning (den forurening, som på længere sigt vil give økologiske skader) allerede så småt var overskredet i 1880. Det var netop dette område, som var på tale i forbindelse med Barsebäck-debatten for et par år siden, hvor der blev peget på den forurening, som dansk brug af fossilt brændsel medførte. Men den var altså ved at være gal allerede på et tidspunkt, hvor det danske bidrag måtte være helt ubetydeligt.

## Andre stoffer

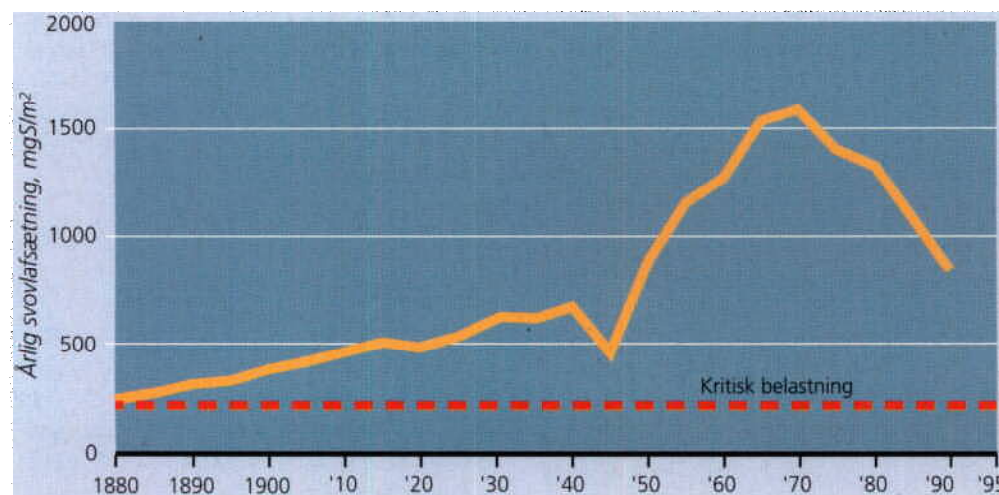
For svovlforureningen er der, som det fremgår, opnået væsentlige reduktioner, og det europæiske udslip er nu næsten halveret i forhold til 1980. For andre stoffer er reduktionerne mere beskedne: Kvælstofoxider ca. 7%, ammoniak 15% og organiske forbindelser 9%.



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



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.



Den tilsvarende svovlafsætning i Sydsverige sammenlignet med 5% kritisk belastning. (Efter: Mylona 1993)

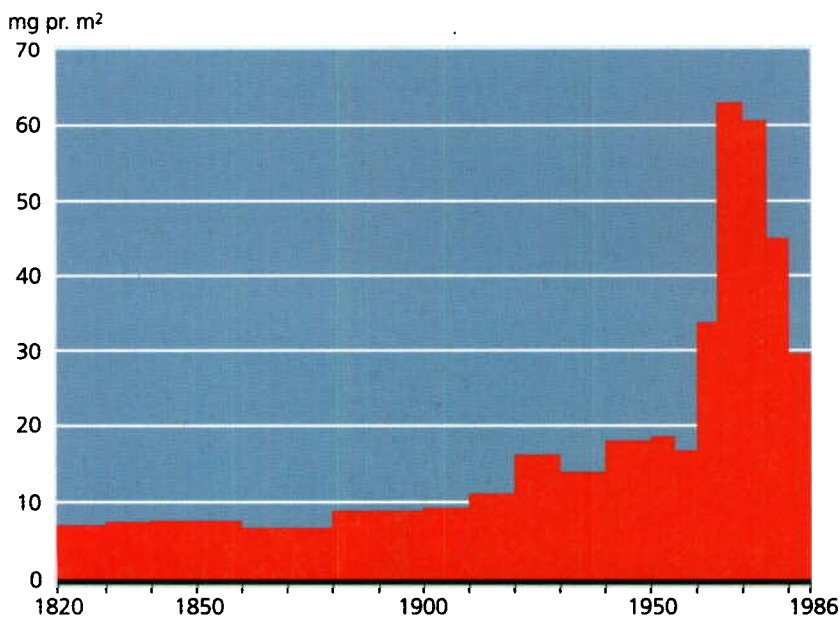
# Tungmetaller før og nu

Forurening med tungmetaller er startet indendørs allerede med anvendelse af ild til lys og varme i klippehuler, og tungmetaller fra industrielle anvendelser er tidligt blevet langtransporteret.

## Danske målinger i moser

Udviklingen i atmosfærens sammensætning måles i dag mange steder på jorden. Men hvis man vil vide, hvordan forholdene var for mere end blot 40 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).

*Udviklingen i blynedfald på Dravad Mose. Indtil omkring 1960 vokser forureningen langsomt på grund af stigende industrielle blyanvendelser. Derefter sker en brat stigning, der tilskrives anvendelsen af blyadditiver i benzin til den voksende trafik. Senere falder forureningen igen som følge af lovmæssige begrænsninger i benzins blyindhold (se også side 22). (Data fra O.S. Jacobsen, GEUS).*



## Tungmetaller i iskerner

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

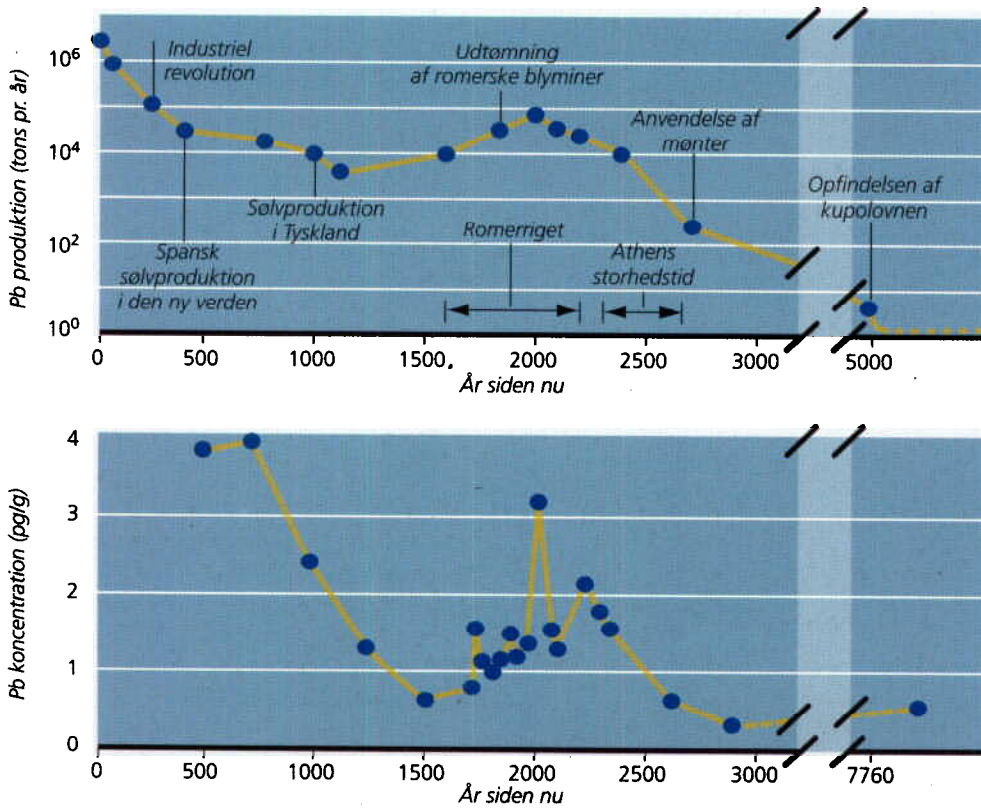
Omkring år 500 før Kristus begyndte grækerne at udvinde bly og sølv på basis af blyulfid med et lille sølvindhold. For at udvinde sølvet smeltede man malmen i en luftstrøm, der oxiderede blyet som så kunne skummes af. Det har vist sig, at allerede dengang begyndte koncentrationen af bly i atmosfæren at stige væsentligt over det naturlige niveau - og det toppede midlertidigt omkring år 0 samtidigt med blyproduktionen i det romerske imperium (figur, modstående side). 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 lokalområdet 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 hypotese, 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 sammensmelte det med tin til bronze. Også kobber har kunnet påvises i grønlandsk is, hvor indholdet ligeledes begyndte at stige over det naturlige niveau 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 det 13. århundrede er 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 sker der selvfølgelig en kraftig stigning ved industrialiseringens begyndelse i forrige århundrede. Men igen kan man forestille sig, hvordan den lokale forurening omkring en primitiv industri må have været.



Udviklingen i den globale blyproduktion siden opfindelsen af den såkaldte kupolovn 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.

Blykoncentrationen i iskerner fra en boring på Grønland. (Efter: Hong et al. Science 265, 1841-43).



Fremstillingen af denne kinesiske bronzehund har sat sig spor i den grønlandske indlandsis.

# Los Angeles smoggen

*“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 andre toner end dem, man nu kan høre i den offentlige debat hver sommer. Her får ozon skyld for en række problemer inklusive “skovdøden”, i særdeleshed efter at svovlforureningen og forsuringen ikke er så slem, som den har været, og nogle træer alligevel sygner hen.

## Det begyndte i Californien

Denne nye type forurening blev først observeret 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 åndedrætsbesvær 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

*Smog i Los Angeles, Californien.  
(Foto: West Light, Nordfoto).*

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 halvferdserne i Norge og Sverige og derefter også i Danmark.

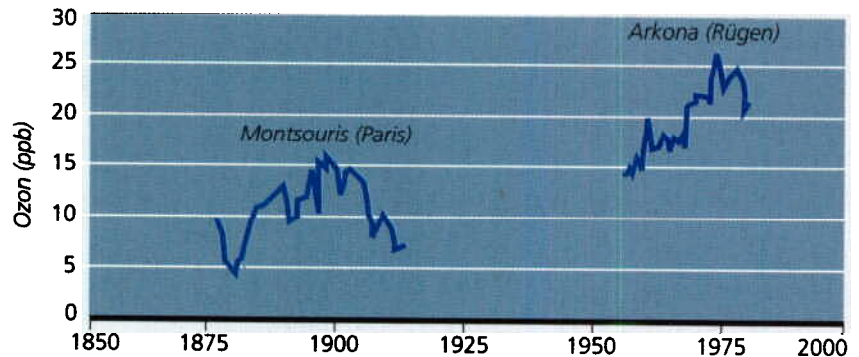
En af de længste ozon-serier i Europa er målt på Rügen (figur, øverst), hvor den årlige middelværdi voksede fra 15 ppb i 1956 til 24 ppb i 1983. Ældre målinger ved Paris viser niveauer omkring 11 ppb. Man skal være varsom med resultater af gamle målinger, men meget tyder på, at de gennemsnitlige ozonniveauer 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, midten) 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, nederst) går kun omkring 10 år tilbage og viser ingen klar tendens.

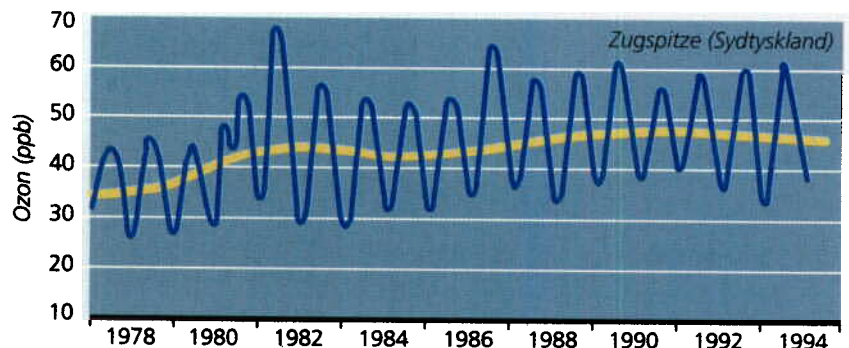
Dette generelle billede er i rimelig overensstemmelse med, at de europæiske emissioner af kvælstofoxider og kulbrinter (der i høj grad skyldes biltrafik) vel er steget kraftigt siden forrige århundrede, men dog har ligget ret konstant i de sidste 10 år.

1 ppb er 1/1.000.000.000 målt som volumen. Det svarer til omkring 2/1.000.000 gram per kubikmeter.

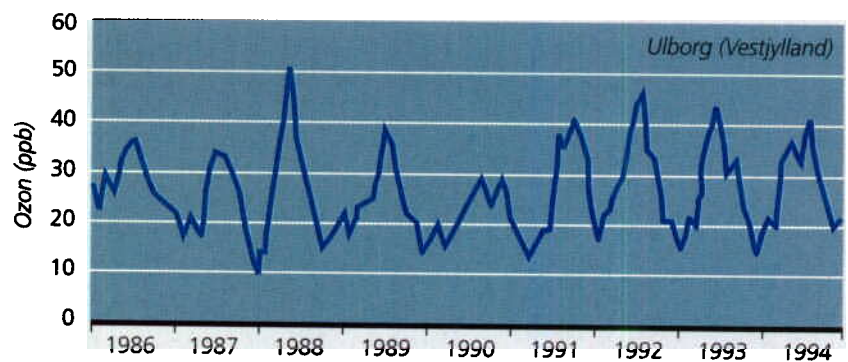
(For en mere detaljeret fremstilling med, referencer se Temarapport fra DMU 3/1995 om Ozon som luftforurening).



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.



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



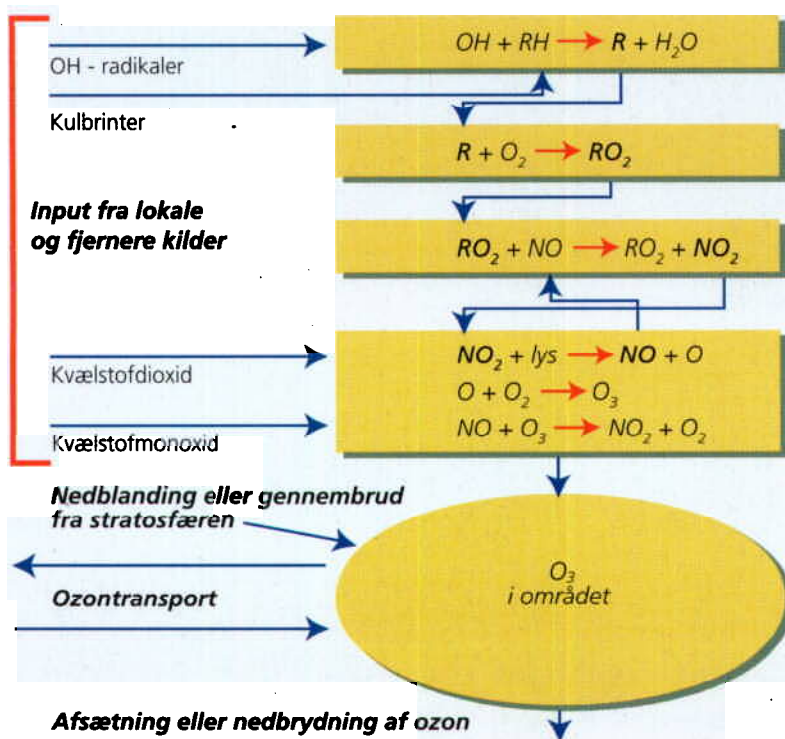
Danske målinger af ozonkoncentrationen ved Ulborg i Vestjylland. Også her ser man en tydelig årstidsvariation, men ingen langtids-tendens.

# Hvor kommer ozonen fra?

Størstedelen af atmosfærens ozon (90%) findes i stratosfæren. Herfra nedblandes langsomt ozon 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 gennembrud 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 harmløs!*

## Fotokemiske reaktioner

I praksis optræder imidlertid både meget lavere og meget højere koncentrationer.



Det skyldes en række sammenkoblede atmosfærekemiske processer mellem kvælstofoxider og kulbrinter under indflydelse af sollys (figur).

Stærkt forenklet starter dannelsen af ozon ( $O_3$ ) i troposfæren ved at sollys med en bølglængde mindre end 400 nm spalter kvælstofdioxid ( $NO_2$ ) i kvælstofmonoxid ( $NO$ ) og iltatomer ( $O$ ). 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  $O_3$  afhæng af forholdet mellem  $NO_2$  og  $NO$ .

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 benzinerbiler over 90%.

Imidlertid er der flere reaktioner i atmosfæren, som ændrer forholdet mellem  $NO$  og  $NO_2$ . Afgørende er flygtige organiske kulbrinter, der kan omdannes til forbindelser, der reagerer med kvælstofmonoxid ( $NO$ ) og danner kvælstofdioxid ( $NO_2$ ). Og så er vejen åben for dannelse af mere ozon.

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, medens der er relativt *lave* niveauer i byerne; paradoksalt nok netop på grund af biltrafikken! Det skyldes, at den kvælstofoxid, der udsendes fra biler, har den, i sig selv, relativt harm-

løse form NO (kvælstofmonoxid), som i atmosfæren reagerer med ozon og danner den sundhedsfarlige NO<sub>2</sub> (kvælstofdioxid). Samtidigt 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 i København hver weekend, når udslippet af kvælstofmonoxid i byens gader går ned, fordi der er mindre trafik, hvorefter niveauet af ozon går op (figur, til højre).

## Andre fotokemiske produkter

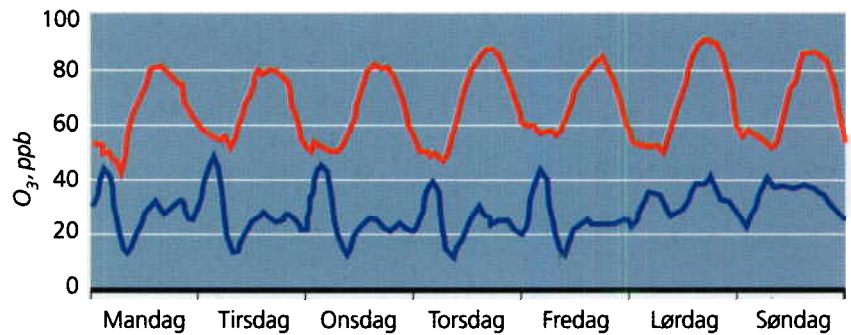
Selvom ozon er det væsentligste, og i hvert fald det mest omtalte, stof i "fotokemisk smog", har også en række andre stoffer betydning. Sideløbende med ozon, eller ved reaktioner med ozon, kan der fx dannes stoffer som aldehyder og peroxyacetylnitrat (PAN), der virker øjenirriterende.

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 forsuring (side 26-27).

## Langtransporteret ozon

Grænseoverskridende forurening blev først studeret i forbindelse med forsuringfænomener som følge af svovl- og kvælstofforurening, men den optræder selvfølgelig også med ozon og andre fotokemiske oxidanter, der kan opblandes over store områder, før de nedbrydes kemisk eller afsættes fysisk. Størstedelen af den ozon vi har i Danmark, skyldes i det væsentlige 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



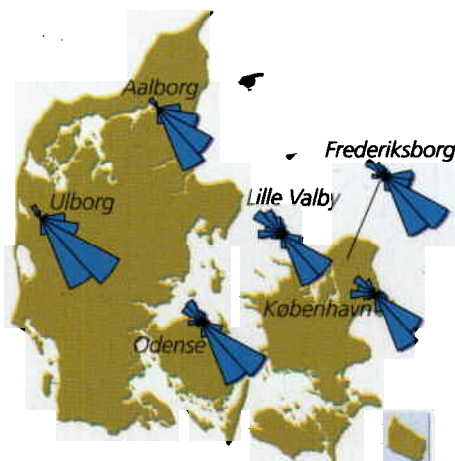
samtidig er stor emission. Hertil kommer, at høje temperaturer forøger afdampningen af organiske forbindelser fra vegetation - typisk granskove - der indgår i reaktionerne.

Om sommeren vil man derfor oftest se høje ozonniveauer, når vinden blæser fra Centraleuropa (figur, nederst). 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 forureninger 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.

Gennemsnitligt ugeforløb af ozonniveauer 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 gennemsnitligt er højere i weekenden, hvor der er mindre trafik.



Forureningen blæser med vinden, og selv om den ikke går i rette linier tværs over hele Europa, kan ozonniveaernes afhængighed af vindretningen et give et indblik i del af ozonens oprindelse. Retningsdiagrammerne viser spidsværdier (98%-fraktile) for hele året.

# Effekter og bekæmpelse

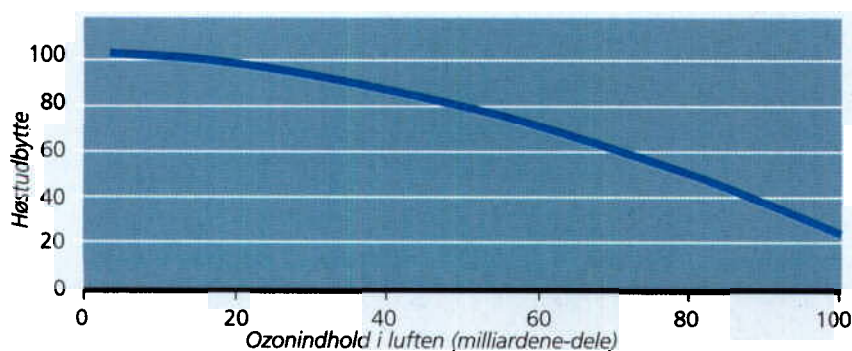
## Sundhed og velvære

Mange stoffer kan optages i den menneskelige organisme ad forskellige veje fx gennem drikkevand og føde eller eventuelt direkte gennem huden. Fotokemiske oxidanter - og herunder ozon - har kun virkninger som luftforurening. Generelt viser en række undersøgelser, at der er en sammenhæng mellem ozonniveauet i udeluften og symptomer fra luftveje og lunger (irritation, hoste) samt hovedpine. Og kritiske niveauer er ikke usædvanlige i central- og sydeuropæiske byer.

Selvom EU's informationsniveau på 180  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  lejlighedsvis overskrides i Danmark, er der ikke her tale om noget stort sundhedsproblem i sig selv. Ozon kan dog indirekte have betydning ved at være bestemmende for dannelsen af kvælstofdioxid, der i nogen udstrækning har samme virkning på luftvejene som ozon. Samtidigt kan de andre stoffer, der dannes ved fotokemisk aktivitet, fx aldehyder have generende effekter.

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.

*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-Kommissionen 1993).*



## Skader på afgrøder

Allerede under de første fotokemiske smog-episoder i Californien observerede man skader på vegetation, specielt vinstokke. 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 vil samlet medføre hurtigere nedvisnen og nedgang i biomassetilvæksten og dermed ringere høstudbytte (figur).

Skønsmæssigt kan skader på afgrøder i Danmark bevirke 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 på af størrelsesordenen 1 milliard kroner om året.

Man ved endnu ikke, hvor meget fotokemisk luftforurening betyder for planter i naturen, men som vist side 28-29 spiller ozon også 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 menneskeskabte kilder til ozon. Man kan derfor vanskeligt 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 næsten hver sommer 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 det derfor ikke logisk 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. Der kan også være tale om ozon, transporteret sydfra.

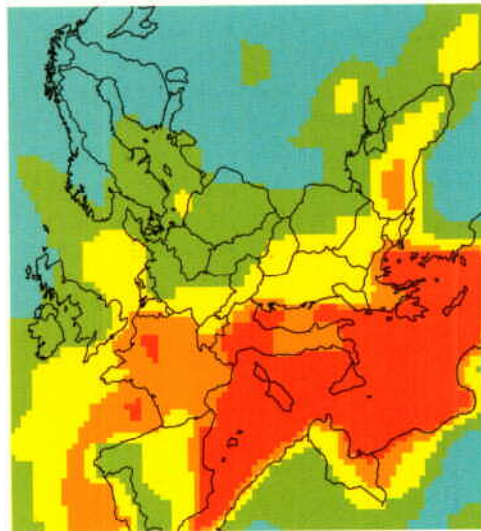
På længere sigt derimod, gælder det selvfølgelig om at få reduceret de samlede udslip af kvælstofoxider og kulbrinter, og her tæller de danske udslip med i det store regnestykke. For før eller siden vil også vores forureninger bidrage til dannelsen af ozon i europæisk målestok; nedbrydningen af ozon er kun et rent lokalt fænomen.

### Hvad kræves der?

Den første NO<sub>x</sub>-protokol under Genevekonventionen omfattede en stabilisering af udslippet i perioden 1987-94. Senere har 12 lande underskrevet en deklaration om at ville reducere med 30 % i perioden 1986-98. Hvad angår kulbrinter skal der senest i 1999 ske en reduktion på 30% i forhold til 1985. Modelberegningerne (figur) antyder, at en sådan generel europæisk 30% reduktion i udslippene af de primære forureninger ikke vil være nok for at undgå vegetations-skader på hvede i Danmark, hertil kræves mindst 40%. Skal vegetationskader forhindre

i hele Europa må man op på en reduktion på 95%. Og det kan vel næppe anses for politisk eller økonomisk gennemførligt.

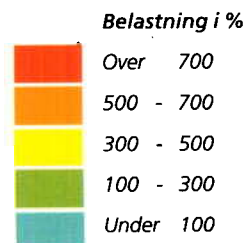
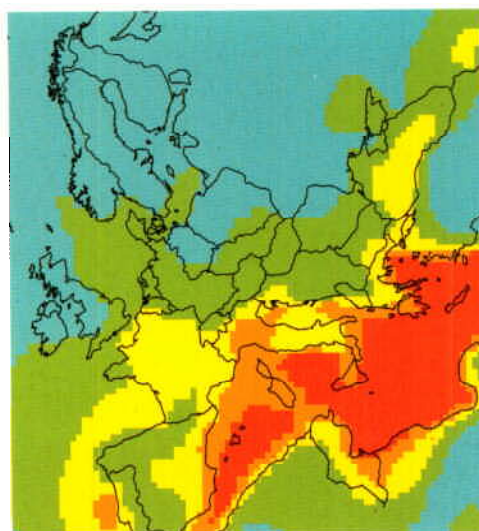
Danmark kan desværre ikke umiddelbart opnå noget ved at gå enegang. Tværtimod! I den hypotetiske situation, at alle danske forureningsudslip - og kun disse - blev stoppet, ville der ganske vist blive en smule mindre ozon i det samlede Europa, men der ville - vel overraskende for de fleste - komme omkring 1% mere ozon i Danmark (jvf. Tema-rapport 3/1995, om ozon).



Modelberegninger af den kritiske belastning af afgrøder i Europa som følge af ozonforurening. Kortene viser belastningen i % i forhold til det kritiske niveau.

Øverst ses situationen med de udslip der var i 1989.

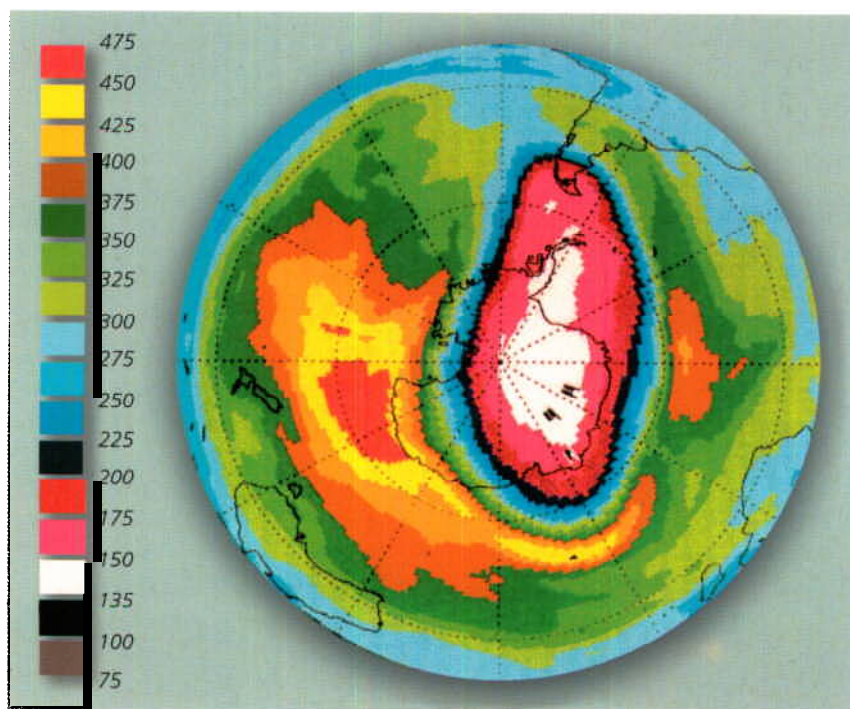
Nederst er vist situationen, som den ville have været i samme år, hvis samtlige udslip af kvælstofoxider og kulbrinter havde været reduceret med 30%. Forbedringen er synlig, men på ingen måde tilstrækkelig. (Efter: Zlatev, Fenger, Mortensen. Computers Math. Applic. 32, 101-123, 1996).



# Hullet i himlen

Ozonhullet over den sydlige halvkugle 17. oktober 1994. Man ser, at det strækker sig helt op over sydspidsen af Sydamerika.

Ozon måles i såkaldte Dobson enheder, der udtrykker tykkelsen af ozonlaget, hvis det blev trykket sammen til 1 atmosfære ved 0 °C. Normalværdien er 3 mm svarende til 300 Dobsonenheder.



Sideløbende med problemerne med ozon i lav højde begyndte ozon at optræde i en helt anden rolle. I midten af halvfjerdserne 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 smogepisoder. Og det var ikke så mærkeligt, for man var fløjet gennem det såkaldte ozonlag (side 9). Selvom 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 man frygtede, at udstødningen fra flymotorene, specielt kvælstofoxider, skulle 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

I 1982 blev så de første tegn på ozonnedbrydning observeret. Overraskende nok skete det på Antarktis, hvor et engelsk forskerhold målte den totale ozonsøjle med 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 værende fejlagtige.

## CFC som årsag

Fænomenet viste sig imidlertid at være anderledes, end man først havde forestillet sig. Årsagen var ikke højtgående flyvemaskiner (som ikke havde fået den udbredelse, man havde ventet), men en mere jordbunden udsendelse af "CFC" og beslægtede forbindelser.

CFC er fællesbetegnelsen for en række kunstigt fremstillede stoffer, chlorfluorcarboner. 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.). Men netop deres store stabilitet, betyder,



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 CFC-forbindelserne når op i ozonlaget, vil de blive spaltet af den kraftige ultraviolette stråling, hvorved der frigøres kloratomer. Gennem kædereaktioner kan hvert af disse kloratomer nedbryde mange tusind ozonmolekyler (figur, øverst).

Når fænomenet først blev observeret over Antarktis, hvor der ikke er nogen forureningskilder, skyldes det helt specielle meteorologiske forhold. Dels de ekstremt lave temperaturer, hvor klorholdige forbindelser fryser ud på iskrystaller i skyer om vinteren (vores sommer) og frigøres på én gang om foråret; dels et vindsystem, "den polare vortex", der holder sammen på det hele. Fænomenet er dog senere også blevet iagttaget over arktis, hvor der pletvis er målt nedbrydning op til 40 %. Herudover sker der ved andre mekanismer ozonnedbrydning over andre dele af kloden fx på den nordlige halvkugle, hvor ozonlagets tykkelse er faldet ca. 5% siden 1980 (figur, nederst).

*Total ozon i Europa og Nordamerika vist som afvigelser fra 1964-1980 gennemsnittet. (Kilde: WMO 1995).*

# 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 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. 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 ozon 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. Man kan også opfatte det, som om den effektive drivhusvirkning af CFC-erne er lille. På den anden side vil den forøgede dannelse af ozon i lav højde *forstærke* drivhuseffekten.

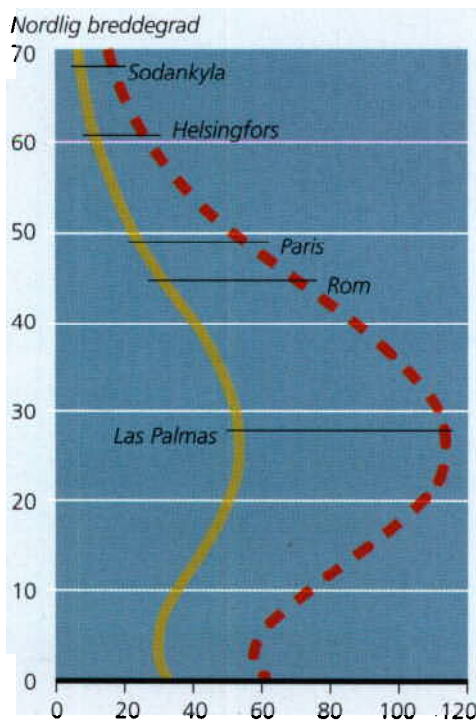
Uanset hvad nettovirkningen er, bliver der lavet om på atmosfærens termiske struktur. Billedligt talt kan man opfatte det, som om ozonlaget lægger "et låg på troposfæren" ved at danne en inversion, tropopausen, der forhindrer lodrette luftbevægelser (side 8-9). Derfor vil en udtynding af ozonlaget kunne medføre uforudsigelige ændringer i atmosfærens generelle cirkulation, og det vil formentlig betyde et mindre stabilt globalt klima.

## Økologiske effekter

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

På forskellig måde 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 vil 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



Risikoen for hudkræft som følge af nedbrydningen af ozonlaget afhænger af breddegraden. Den fuldt optrukne kurve viser antallet af ekstra tilfælde af hudcancer pr million personer svarende til situationen i 1992. Den stiplede kurve viser antallet ved en antaget fordobling af nedbrydningen, hvis folk ikke vænner sig til at beskytte sig mod for meget solstråling. (Efter: Miljöns framtid i Finland 1996).

længere bølgelængde, som skal bruges i fotosyntesen, passere. Ved forøget stråling vil algerne i de øvre vandmasser direkte skades. Da de udgør det nederste led i havets fødekæde, vil det i alle tilfælde kunne få konsekvenser for de højere led - herunder fisk.

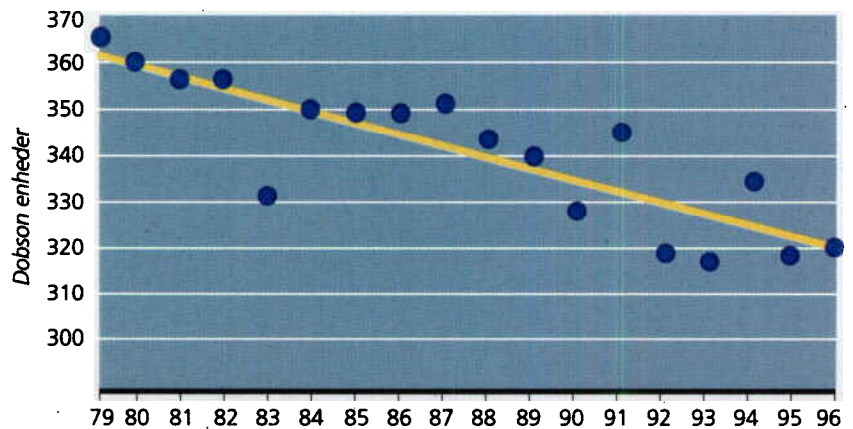
Det vil igen kunne få konsekvenser for klimaet. Havenes phytoplankton er nemlig et væsentligt dræn for kuldioxid, og enhver ændring i UV-strålingen vil derfor kunne påvirke det globale kulstofkredsløb og dermed atmosfærens indhold af kuldioxid. Herved påvirkes jordens varmebalance og følgelig det globale 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.

Specielt er DNA i hudceller følsomt over for UV-B stråling og kan udvikle hudkræft. Det er anslået, at 1% reduktion i den totale ozonmængde vil medføre en 2% stigning i antallet af ikke-melanom hudkræft (figur, til venstre). Betydningen for udvikling af malignt melanom (modermærke)kræft er mindre klar.

Andre mulige skader er udvikling af grå stær (figur) og nedsættelse af immunforsvaret.



## 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.

Udviklingen i den totale ozonmængde over Danmark siden 1979. 1 Dobson enhed svarer til 0,01 mm ozon ved 1 atmosfæres tryk og 0°C. Ozonmængden er i gennemsnit faldet med 0,7% om året.

(Efter Danmarks Meteorologiske Institut 1997).

Øje med grå stær, hvor linsen bliver uigennemsigtig. Forøget forekomst af grå stær er en mulig konsekvens af forøget UV-stråling. (Foto: H. Chr. Wulf).

# På rette vej, men langsomt

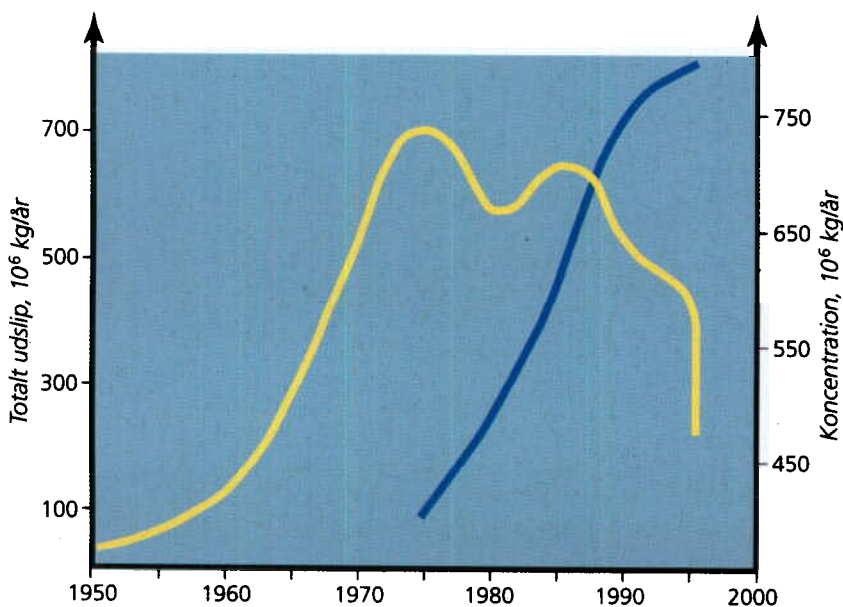
## Udslip og koncentrationer af CFC-gasser

CFC og lignende forbindelser har som nævnt haft udbredt industriel anvendelse som opblæsningsmidler i skumplast, kølemidler, drivmidler i spraydåser og meget andet. En væsentlig årsag hertil har været deres store kemiske stabilitet, der også betyder, at de er totalt ugiftige. Men netop denne stabilitet medfører, at stofferne har en lang levetid i atmosfæren; derfor varer det længe, inden en reduktion af udslip giver sig udslag i en reduktion i koncentrationerne.

Hertil kommer, at en række tidligere anvendelser - fx til isolationsmaterialer - har medført, at der kan ske et udslip til atmosfæren længe efter, at det direkte forbrug er ophørt (figur).

De forskellige CFC'er (og lignende forbindelser) er ikke lige effektive til at nedbryde ozon. Effektiviteten angives, i forhold til CFC-11 ved det såkaldte ODP (ozone depletion potential). 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 (tabel). Ved vurderingen af CFC'ernes miljøeffekt skal man desuden tage i betragtning, at de er meget effektive drivhusgasser (side 48-49).

Det årlige 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 først nu ved at nå et maksimum. (Kilde: WMO 1995).



Eksempler på stoffer der nedbryder ozonlaget. Tallet i navnet angiver den nøjere kemiske struktur. Stoffer, der indeholder brint, har kortere middellevetid og mindre ODP.

Stof	Levetid i år	ODP
CFC-11	50	1,0
CFC-12	100	1,0
CFC-113	85	0,8
CCF-114	300	1,0
HCFC-22	13	0,55
HCFC-123	1	0,02
HCFC-1416	9	0,11

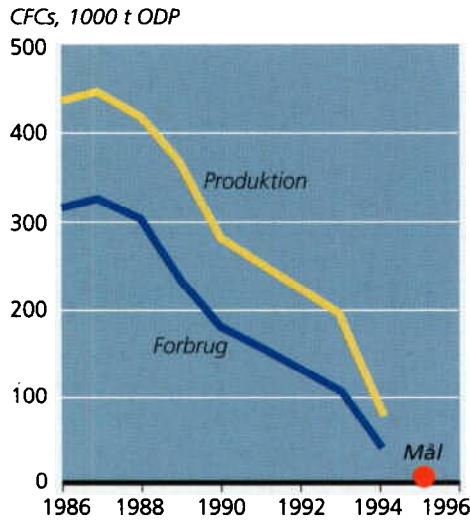
## Den internationale indsats

Efter at årsagen til udtyndingen af ozonlaget 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. I 1987 blev den mere konkrete Montreal-protokol undertegnet; her forpligter parterne sig til inden 1998 at halvere forbruget af de 5 vigtigste CFC'er i forhold til 1986; samtidigt skulle forbruget af 3 haloner (lignende stoffer, der indeholder brom) stabiliseres inden 1992. Ved senere møder i London (1990) og København (1992) er udslipsreguleringen blevet strammet og omfatter nu alle kendte, vigtige ozonlagnedbrydende stoffer. U-lande kunne dog vente op til 14 år med at opfylde aftalerne.

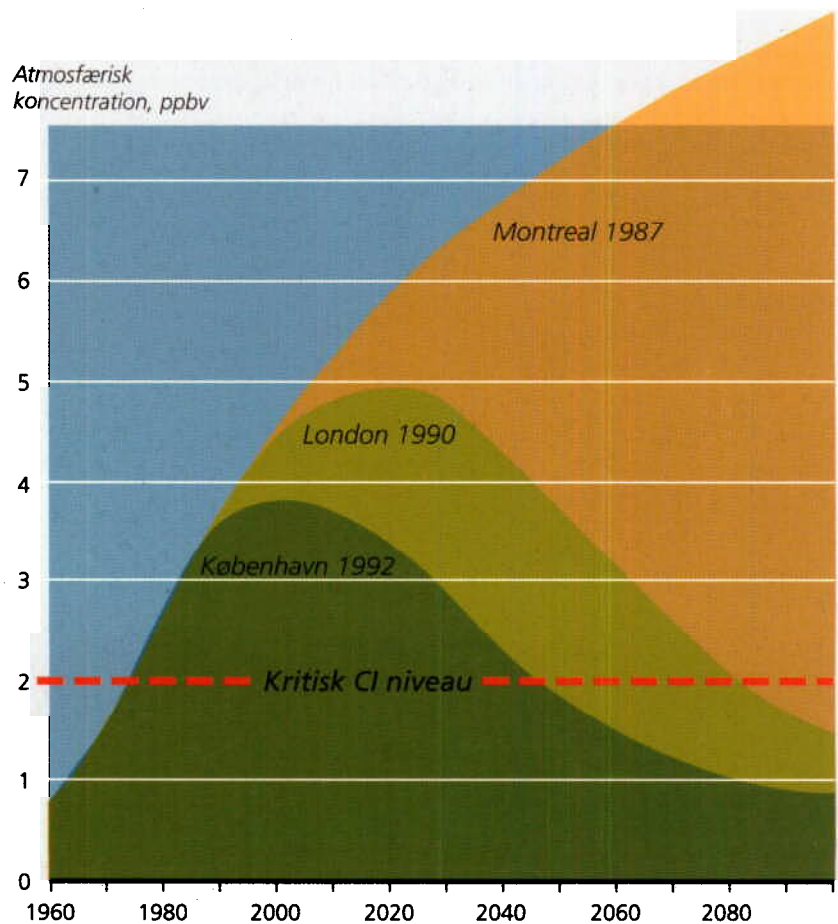
I Europa er produktionen og forbruget af ozonnedbrydende stoffer drastisk reduceret de sidste 10 år (figur, øverst) og de politiske målsætninger er foreløbig opnået. Det er planlagt at afvikle erstatningsstofferne, HCFC inden år 2015.

Selv om alle målsætninger og aftaler opfyldes fuldt ud, vil situationen dog først være normaliseret en gang i anden halvdel af næste århundrede (figur, nederst).

Atmosfærens koncentration af klorholdige forbindelser (omregnet til "klorækvivalenter"). Målt op til nu og beregnet for fremtiden under forudsætning af gennemførelsen af forskellige internationale aftaler om afvikling af CFC'er og andre ozonnedbrydende stoffer. Bemærk, at man i bedste fald skal hen i anden halvdel af næste århundrede før situationen er normaliseret. (Kilde: WMO 1995).



Produktionen og forbruget af CFC'er i Europa, omregnet til CFC-11. (Efter: Wieringa 1995).



# Varmedøden

Kortbølget solstråling går relativt let gennem atmosfæren og opvarmer jordoverfladen. Energien skal stråles tilbage, men det sker ved længere bølgelængder, og en del af energien sendes tilbage mod jorden. Forholdene kompliceres af bl.a. fordampning og varmeledning af vand, skydannelse og luftbevægelser. Resultatet er, at jordatmosfæresystemet 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.

Nedbrydningen af ozonlaget er et alvorligt, globalt problem, men det er allerede utvetydigt observeret, det er nogenlunde vel forstået, og man ved, hvordan det skal løses. 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 argumentationen stadig i det væsentlige 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 fødevarerproduktion - en opgave der alvorligt vanskeliggøres af

stigningen i verdensbefolkningen og udviklingslandenes krav om en forbedret materiel levestandard.

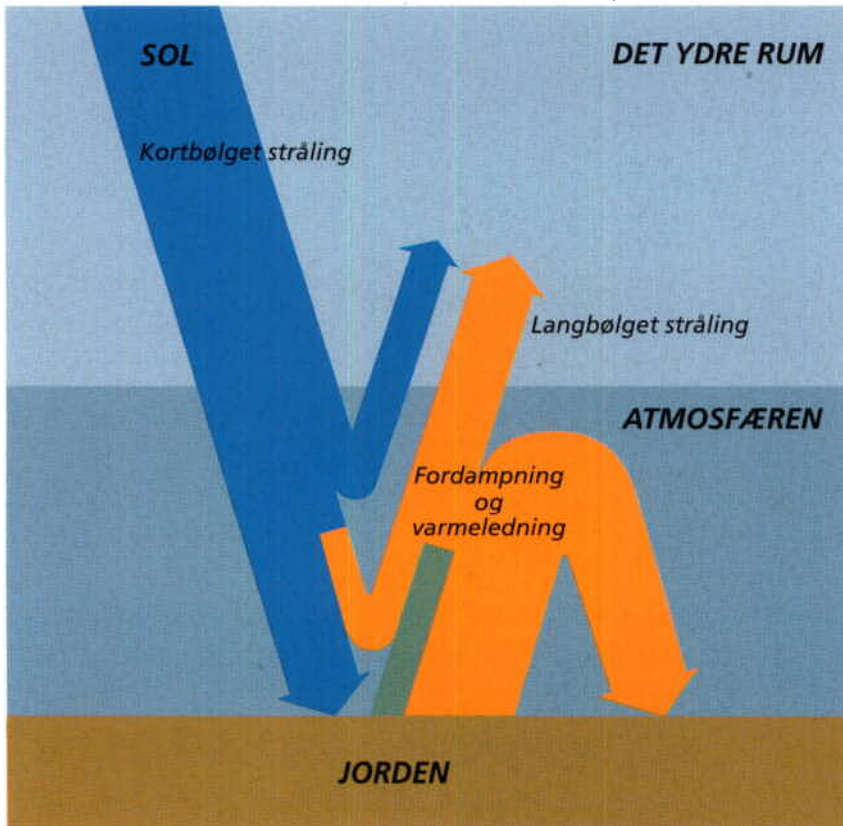
## Drivhuseffekten

Den såkaldte drivhuseffekt (figur) består i, at atmosfæren populært sagt holder på den indstrålede solenergi. Det medfører, at Jordens middeltemperatur bliver ca. 35 °C højere, end den ellers ville have været. Drivhuseffekten er dermed en væsentlig forudsætning for, at der overhovedet kan være liv på Jorden. Problemet er blot, at en række menneskelige aktiviteter ændrer atmosfærens sammensætning; ikke i de basale komponenter, men i 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 kan medføre, at vandstanden i havene stiger - dels fordi vand udvider sig ved opvarmning, dels fordi der kan ske en afsmeltning af gletschere 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, øverst næste side).



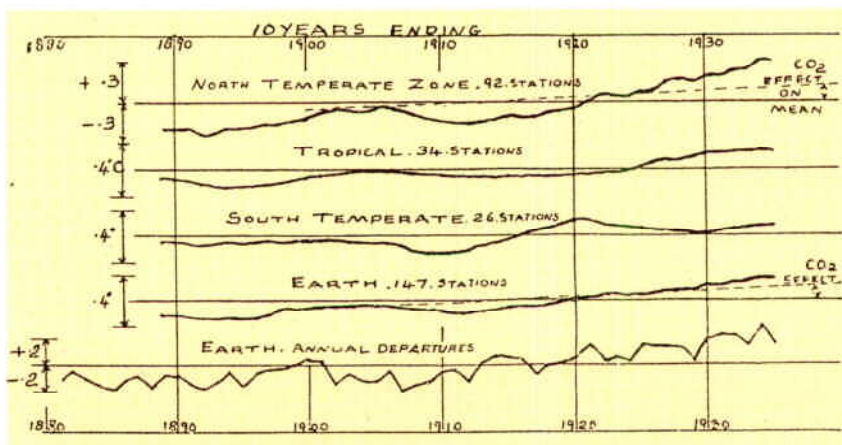
De første undersøgelser blev mødt med nogen skepsis, og det blev hævdet, at den udsendte kuldioxid ville blive absorberet i havet. I øvrigt anså man nærmest en beskeden opvarmning som en fordel.

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 modellere de mulige fremtidige klimaændringer mere overbevisende.

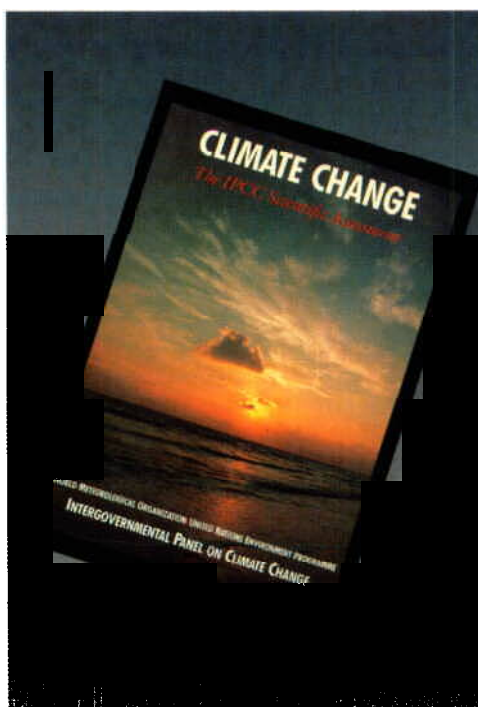
### Det internationale samarbejde

Delvis affødt af Brundtlandrapporten om bæredygtig udvikling, der blev udgivet i 1987 (side 54) oprettedes IPCC (The Intergovernmental Panel on Climate Change) der 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.

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



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.



IPCC's første rapport om klimaændringer udkom i 1990.

De vigtigste drivhusgasser er vanddamp og kuldioxid, men også metan, lattergas og ozon har betydning. Hertil kommer CFC og lignende stoffer af ren menneskelig oprindelse.

## Kuldioxid

De menneskeskabte udslip udgør kun få procent af transporterne i det globale kulstofkredsløb (side 10-11), 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 ca. 30% siden industrialiseringen.

## 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 brug af fossilt brændsel og 40-60% fra andre menneskeskabte kilder, herunder forgæring i våde rismarker og i drøvtyggers fordøjelsessystem.

## Lattergas

Naturlige kilder til lattergas er 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 steget 14%.

## CFC

Efter 2. Verdenskrig har atmosfæren indeholdt stigende mængder af industrielt fremstillede halocarboner (CFC'er m.fl.),

som foruden at nedbryde ozonlaget (side 40-41) er effektive drivhusgasser.

## Ozon

Ozon er en drivhusgas, som findes både i stratosfærens ozonlag (side 8-9) 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.

## Partikler (aerosoler)

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 modvirkningen aftage.

## Relative opvarmningspotentialer

På samme måde, som man har defineret et ODP for ozonnedbrydende stoffer, har man defineret begrebet "globalt opvarmningspotentialer" (på engelsk global warming potential, GWP), som virkningen over en år-række, fx 100 år, relativt til kuldioxid. 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 af, at en nedbrydning af ozonlaget modvirker drivhuseffekten. Da der er så store forskelle i GWP, kan nogle stoffer få betydning, selvom de optræder i meget små koncentrationer.



## 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.

Fordelingen på aktiviteter er ikke entydig, fx fordi fødevarerproduktion kræver energi og medfører ændringer i arealudnyttelse (herunder skovrydninger), men meget groft taget, og globalt set, er energisektoren ansvarlig for godt halvdelen af påvirkningen og landbrugsproduktionen for en fjerdedel.

## Fremtidsscenerier for drivhusgasser

Ud fra forudsætninger om befolkningstilvækst, økonomisk vækst, energieffektivitet og tilgængelighed af energikilder har IPCC opstillet 6 scenarier for fremtidige udslip af drivhusgasser og aerosoldannende stoffer. Til videre modelberegninger af menneskeskabte klimaændringer benyttes normalt et "mellemscenarier", der bl.a. forudsætter effektivitetsforbedringer i energiudnyttelsen i takt med den teknologiske udvikling, og en befolkningstilvækst der følger et mellemscenarier fra FN og Verdensbanken med 11,3 milliarder mennesker i år 2100. Kuldioxidkoncentrationen bliver omtrent fordoblet, men den (og dermed klimaet) bliver *ikke* stabiliseret.

## Stabiliserings-scenerier

Man har også regnet baglæns og forudsat forskellige koncentrationsforløb, hvorefter man har bestemt hvilke udslipsforløb, de svarer til (figur). En stabilisering på 350

ppm (nær den nuværende koncentration) omkring år 2100 vil kræve, at man sigter efter et udslip, der ligger under det, man havde år 1900. En stabilisering på 550 ppm (omkring det dobbelte af det, man havde før industrialiseringen) vil kunne opnås omkring år 2150, hvis udslippene bremses op i løbet af det næste århundrede og derefter gradvis reduceres til en fjerdedel af det, vi har i dag.

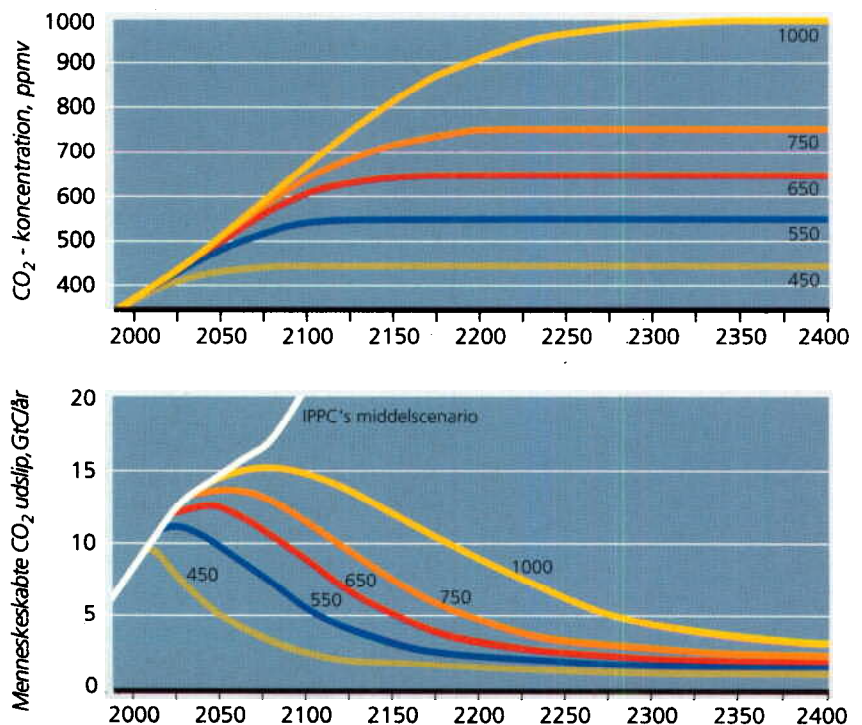
Det skal understreges, at disse beregninger ikke fra IPCC's side udtrykker nogen politisk målsætning. Det er heller ikke diskuteret, hvordan man teknisk skal kunne realisere de beregnede udslipsreduktioner. Der er kun tale om en demonstration af problemets omfang.

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!

Øverst: Antagede forløb der fører til stabilisering af atmosfærens indhold af kuldioxid på forskellige niveauer i løbet af de næste par hundrede år.

Nederst: Beregnede globale udslip af kuldioxid svarende til koncentrationsforløbene vist ovenfor.

Det ses, at selvom man vil acceptere en stigning i koncentrationen til tre gange den nuværende, vil det på længere sigt kræve, at udslippene halveres. Som vist vil IPCC's middelscenarier ikke føre til nogen stabilisering



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 udslipsscenerier, 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 forbedrer beskrivelsen af vekselvirkninger mellem atmosfæren og oceanerne, betydningen af skydække o.s.v.

I takt med denne udbygning har der været en tendens til, at forudsigelserne er blevet mindre foruroligende - måske inden for usikkerhederne, men alligevel! I begyndelsen af firserne talte man stadig om, at en fordobling af kuldioxidindholdet i atmosfæren ville give en temperaturstigning på 5 °C, i 1990 var den officielle udmelding omkring 4 °C, og reviderede beregninger i 1992 gav omkring 3 °C. Efter IPCC's seneste udmelding er 2 °C mere rimeligt (figur, øverst).

På samme måde er det gået med vandstandsstigningerne. 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 en gang i næste århundrede. I 1990 var man nede på 66 cm i år 2100, og nu er det bedste bud 50 cm (figur nederst). 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 usikkerhederne på scenarier og modelberegninger bliver for længere tidsrum så store, at man let ender i rent gætteværk.*

Samtidigt har det imidlertid vist sig, at der er fænomener, modellerne ikke kan gøre rede for. Undersøgelser af bl.a. iskerner 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 om vores nuværende ændringer af atmosfærens sammensætning udgør nogen risiko i denne retning.

Når vi i Nordeuropa har et klima, der er varmere end på tilsvarende breddegrader i Nordamerika skyldes det den såkaldte "Golfstrøm", der er en del af et globalt system af havstrømme. Normalt løber varmt overfladevand mod nord gennem Atlanten, synker til bunds og strømmer 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 kan det blive koldere i Danmark, selvom det bliver varmere i verden som sådan. I sin yderste konsekvens kunne man forestille sig, at der blev udløst en ny istid.

## Har vi allerede set klimaændringer ?

Det er indiskutabelt, at Jordens middeltemperatur i dag er omkring en halv grad højere, end den var før industrialiseringen tog fart i slutningen af sidste århundrede; 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.

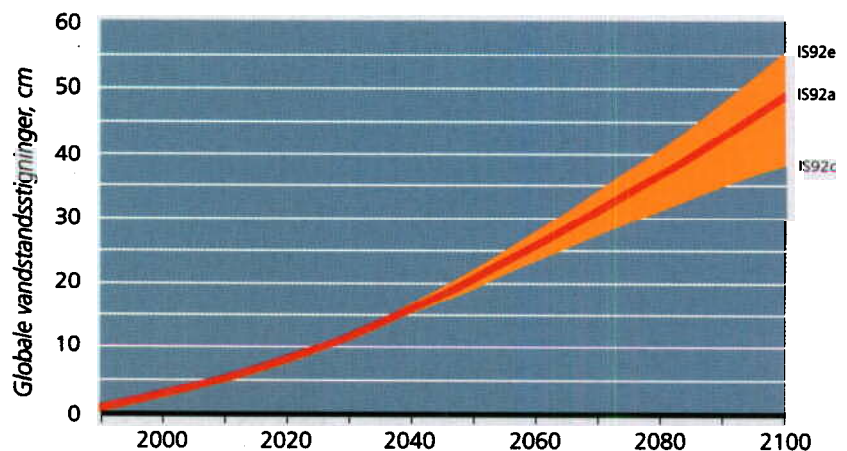
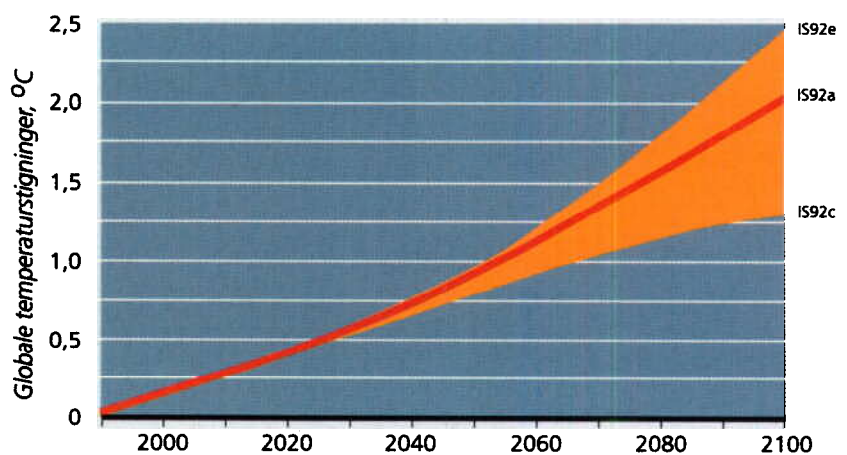
Den globale vandstand er også steget de seneste 100 år, dels på grund af vandets varmeudvidelse, dels på grund af afsmeltning af gletschere og iskapper. På basis af vandstandsmålinger vurderer IPCC (1996), at vandstanden er steget mellem 10 og 25 cm. Det relativt store usikkerhedsinterval skyldes, at målingerne også indeholder ændringer på grund af jordskorpens bevægelser, der skal filtreres væk fra målingerne.

I den offentlige og politiske debat lægges der stor vægt på, at IPCC nu i sin kortfattede version udtaler, at "en samlet vurdering peger mod en skelnelig menneskelig påvirkning af det globale klima". Men fra anden side hævdes det, at de observerede temperaturændringer kan have en "naturlig" forklaring. Det seneste bud er, at de skyldes variationer i solens magnetfelt, der påvirker mængden af kosmisk stråling, som når Jorden. Herved påvirkes Jordens skydække og følgelig dens klima.

*Det væsentlige er imidlertid ikke, om vi allerede nu har påvirket klimaet udover de naturlige variationer, men om der er overensstemmelse mellem observationerne og modelberegningerne. Kun i så fald kan man tro på beskrivelserne af fremtidens klima. Derfor er det nødvendigt at tage alle mulige naturlige og menneskeskabte effekter i betragtning.*

*Øverst: Temperaturudviklingen vil afhænge af, hvordan verden udvikler sig. I forskellige scenarier antager man fx en verdensbefolkning, der varierer mellem 6,4 og 17,6 milliarder i år 2100. Det farvede område viser spændet i scenarier. Kurven i midten svarer til IPCC's middelscenario. Ingen scenarier viser, at temperaturstigninger helt kan undgås.*

*Nederst: Hvis den globale temperatur stiger, vil det betyde, at vandstanden i havene stiger. Det har to årsager: Der vil ske en afsmeltning af is fra gletschere, og vandet vil udvide sig med opvarmningen. I IPCC's middelscenario vil den gennemsnitlige vandstand være omkring en halv meter højere i slutningen af næste århundrede.*



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 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”.*

Såkaldte “røde rødgraner”, der vanskeligt kan tåle milde vintre, bør på længere sigt udskiftes med fx bøg (Foto: J. Bo Larsen).

## 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 både for naturlige økosystemer og landbrugsproduktion. Det kan fx blive tilfældet i Middelhavsområdet og i det indre af kontinenterne, 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 *klimavariabiliteten*, kan man i Europa - som gennemsnit - modvirke produktions-tab i landbruget ved tilpasning i form af valg af andre afgrøder, kunstvanding mv. I forbindelse med vækststimulationen fra det stigende CO<sub>2</sub>-indhold i atmosfæren er der endda mulighed for et større udbyttepotentiale. 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.

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 blandingskov med mere løvtræ (figur til venstre). Overladt til sig selv synes træarter kun at kunne udbrede sig op til

200 km pr århundrede. Derfor er der risiko for at artssammensætningen i naturskove vil ændres, og at hele skovtyper bl.a. i det nordlige Skandinavien kan forsvinde. Samtidig vil nye økosystemer kunne etableres.

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

## 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 ved udbygning af de allerede eksisterende diger. Det samme gælder en forøget kysterrosion, som også vil ramme Danmark. Kritiske europæiske områder vist i figuren. De alvorligste problemer vil opstå i udviklingslandenes store floddeltaer og på de små lavtliggende koraløer. Maldiverne, en ø-gruppe sydvest for Indien, hvor 200.000 mennesker bor på et samlet areal som Langeland, er direkte truet med udslettelse.

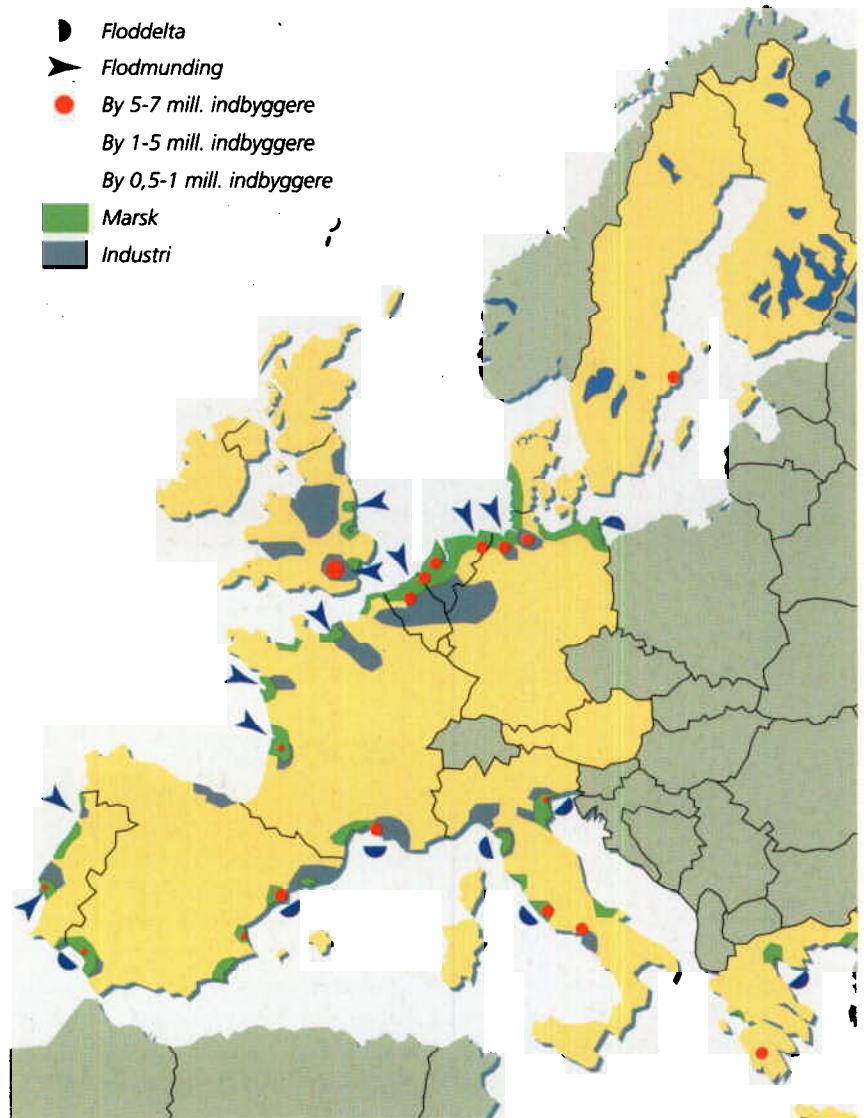
## Økonomiske vurderinger

Til trods for alle disse mulige ulykker, synes flere foreløbige vurderinger at tyde på, 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 imidlertid siges, at der er tale om gennemsnitsbetragtninger - enkelte

områder kan blive meget hårdt ramt. Og man har slet ikke prissat belastningen af følsomme økosystemer. Alligevel kan resultaterne virke misvisende. Fejlen er, at drivhusproblemerne ikke må tages ud af en endnu større sammenhæng. Menneskeskabt klimaændring 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.

*Europæiske kystområder, der er truet af en vandstandsstigning og indtrængning af saltvand i grundvandet (Efter: Wieringa 1995). I Danmark er kun marsk-områder i Sønderjylland angivet, men der kan opstå forøget kysterrosion mange andre steder.*



---

## Brundtlandrapporten og Danmark

I 1987 udgav Brundtlandkommissionen sin rapport "Vor fælles fremtid". Den erkender konflikten mellem på den ene side vækst i befolkningstal og materiel levestandard og på den anden side beskyttelsen af miljø og ressourcer, men ser dog vækst som en nødvendig forudsætning for kampen mod fattigdom og miljønedbrydning. Den globale vækst skal imidlertid være "bæredygtig", og rapporten konkluderer, at de industrialiserede lande inden for de næste 40 år (dvs. inden omkring 2030) skal halvere energiforbruget per indbygger for at give plads for et merforbrug i udviklingslandene på 25% per indbygger.

Som en direkte følge af "Brundtlandrapporten" blev der i 1988 vedtaget en folketingsbeslutning om en halvering af Danmarks energiforbrug. Efterfølgende er der udarbejdet en række handlingsplaner for, hvordan dette mål kan realiseres - senest i 1996 med "Energi 21", der fastholder Danmarks mål på 20% reduktion af kuldioxidudslippet inden år 2005 og en halvering frem mod år 2030.

## Den globale situation

Gennem internationale forhandlinger inden for rammerne af klimakonventionen forsøger man at nå til enighed om lignende (omend ikke ensartede) reduktioner i den industrialiserede verden. Det kan i princippet også lade sig gøre, for med en forventet teknologisk udvikling kan vi leve uden materielle ofre med halvdelen af det energiforbrug per indbygger, vi har nu. Og vi kan også på forskellig vis udvinde energien, uden at det medfører så meget for-

urening. Hvis I-landene yderligere sørger for at begrænse befolkningen, har de gjort en rimelig indsats i overensstemmelse med Brundtlandrapportens anbefalinger. Men det er *ikke* nok!

## I-lande og U-lande

Det basale problem er forholdet mellem I- og U-lande. Det kan opstilles på mange - mere eller mindre manipulerende - måder, men der er *ingen* tvivl om, at indtil nu har I-landene haft hovedskylden for udslippene. Det har fået nogen til at hævde, at I-landene allerede nu skylder U-landene en "forureningsret", som de så kan købe tilbage via passende økonomisk støtte.

I en meget omtalt bog: "Drivhuseffekten i en ulige verden - et eksempel på miljøkolonialisme" spørger 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 et spørgsmål om følelser og politik, men drivhuseffekten har ingen følelser, og alle udslip tæller med.

## Og U-landene skal også bruge mere energi

Med et meget håndfast regnestykke bruger 1/4 af verdens befolkning, der lever i I-landene 3/4 af verdens energi. Så skulle vi dele energien lige over nu, måtte I-landene helt ned på 1/3 af forbruget per indbygger.

Hertil kommer, at jordens befolkning ikke er konstant, men i øjeblikket vokser med ca. 3 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 befolkningstallet formentlig først flader ud hen mod år 2100 og vil da sikkert være over 10 milliarder - med langt den største vækst i U-landene. En verdensomspændende krig eller AIDS-epidemi kan måske ændre situationen, men det er jo ikke attraktive alternativer.

Derfor vil den globale udvikling blive bestemt i U-landene. Vi kan, og skal, påvirke udviklingen gennem økonomisk og teknologisk bistand, men holdningen i U-landene - 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 i et acceptabelt tempo med vindmøller og solceller. Indiens og Kinas udbygning med kulraft er klart tegn på det modsatte.

## Bekæmpelse eller tilpasning?

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

- Ved forsøg på forhindring af ændringer gennem 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.

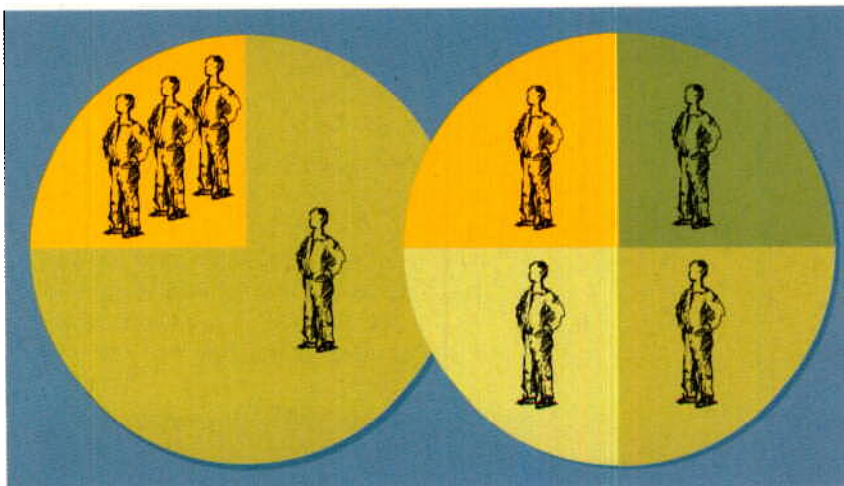
I praksis kan man blive nødt til begge dele, for selv de mest optimistiske scenarier forudsiger visse klimaændringer. Det erkendes også i klimakonventionen, hvis formål er udtrykt som:

*“— 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 fødevarerproduktionen ikke trues; og (iii) muliggøre en bæredygtig økonomisk udvikling”.*

Præcist hvad der er farligt er et delvist politikspørgsmål, men teknisk og videnskabeligt har det været foreslået, at en temperaturstigning på 0,1 °C og en vandstandsstigning på 2 cm per tiår må være acceptable. Sammenholder man dette med de beregnede klimaændringer i IPCC's middelscenario (side 51) ser man, at verden - uden en helt ekstraordinær indsats - risikerer det dobbelte.

Hertil kommer, at disse tal udtrykker midelværdier - 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!

*“Den globale energilagkage”. Meget forenklet bruger 1/4 af verdens befolkning 3/4 af den globale energi. Hvis alle jordens indbyggere uden videre skulle dele lige, måtte man i den industrialiserede verden ned på 1/3 af det, man bruger nu. Hvis alle skulle op på 1-landsniveau, skulle der bruges 3 gange så meget energi som nu.*



# Det hele hænger sammen

## Vækst og forurening

Menneskeheden overbelaster Jorden - ingen tvivl om det. Vi er for grådige, vi er for sjukskede, og vi er frem for alt for mange. Et af problemerne er vores forurening af luften. Det har stået på siden civilisationens begyndelse, men har i tidens løb skiftet 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 en 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 eksempel er tilsætningen af bly til benzin. Formålet var at give mulighed for motorer med højere kompression og der-

med større effektivitet. Nu, hvor man igen fjerner blyet fra benzinen, risikerer 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 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:

### - på udslipniveau

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 vil i stordrift svare til, at landbrugsproduktionen forøges. Hermed øges dannelsen af lattergas og udvaskningen af kvælstof.

### - på forureningsniveau

vil de forskellige stoffer i atmosfæren 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 skyl-



des kvælstofoxider og kulbrinter. Men de meteorologiske forhold spiller en stor rolle. Derfor vil klimaændringer påvirke dannelsen af ozon, som samtidigt er en drivhusgas og derfor vil virke tilbage på klimaet.

- CFC-forbindelser nedbryder ozonlaget og er samtidigt 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 i jordniveau, hvilket foruden andre ubehagelige effekter vil betyde dannelse af mere ozon i lav højde og dermed mere drivhuseffekt.

Osv. osv.

### - på effektniveau

kan de forskellige virkninger af luftforurening være svære at adskille:

- Ændringer i klima og forøget UV-stråling kan nedsætte modstandsevnen over for forurening 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 dermed bl.a. svække produktionen af plankton i havet. Foruden den direkte økologiske effekt, vil det betyde, at der bindes mindre kulstof, og dermed kommer der mere drivhuseffekt.

### Politik og videnskab

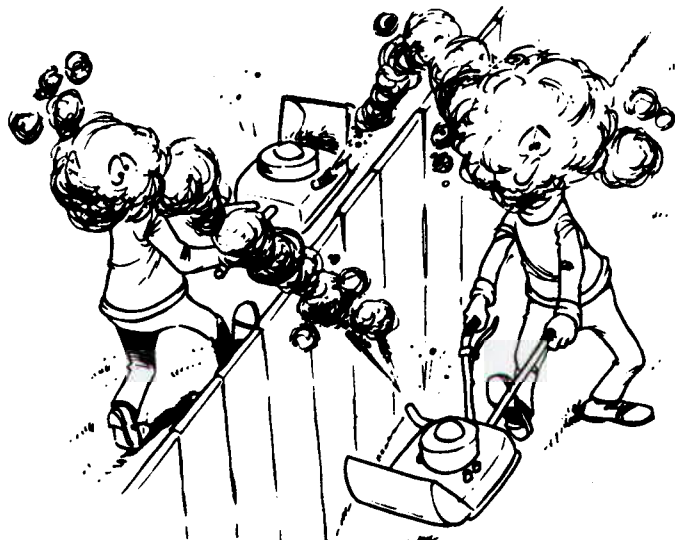
Det er indviklet, men det er måske netop dét, der antyder en morale: Vi har på den

ene side et politisk behov for handling efter nogle enkle, letfattede målsætninger. 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. Man skal bare ikke tro, at der rimeligt bekvemt, kan leve 5 milliarder mennesker på denne jord - og i næste århundrede måske 10 eller 15 - 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 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 forhandlingerne under Genevekonventionen om en såkaldt Multipollutant-Multieffekt-protokol om forurening, 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.

*Efterhånden forurener alle hos hinanden.  
(Tegning fra Euroforum)*



Mennesker har forurenet atmosfæren siden de begyndte at anvende ilden, men omfanget og konsekvenserne er vokset fra et lokalt "her og nu" problem til globale dimensioner med en tidshorisont på flere hundrede år. Det betyder samtidigt, at alle luftforureningsfænomener bliver mere eller mindre sammenkoblede. Hermed fortøner den åbenlyse årsagssammenhæng mellem vore handlinger og deres konsekvenser sig - både tidsmæssigt og geografisk.

## Tidlige beskrivelser

Den tidlige luftforurening var stort set et rent byfænomen. Litteraturen og historiskrivningen viser, at problemerne var store, men en kvantitativ vurdering er vanskelig. På den ene side var folk mindre miljøbevidste, og de havde ingen muligheder for at bedømme langsigtede virkninger af fx kræftfremkaldende stoffer. På den anden side angår de fleste beskrivelser lugtgener og tilsmudsning, som ikke i sig selv behøver at være sundhedsfarlige. En række indirekte oplysninger fra bl.a. skeletfund tyder dog på en afgørende helbredsvirkning for mange hundrede år siden. Også nedbrydning af materialer er veldokumenteret.

Langtransporteret forurening med tungmetaller for flere tusinde år siden er påvist i borekerner fra Grønlands indlandsis og antyder en alvorlig industriel forurening i nærmiljøet. Hovedårsagen til luftforurening var dog fyring - i begyndelsen med træ og andre biobrændsler, derefter med fossile brændsler som kul og senere olie og gas. Hvis man har opgørelser over brændselsforbrug, er det muligt med modelberegninger at vurdere de resulterende forureningsniveauer. Eksempelvis må forureningen i København i midten af for-

rige århundrede i visse henseender have været omkring 10 gange højere end den er nu.

## Den moderne by

Siden 1950 er andelen af verdens befolkning, der lever i byer, vokset med fire gange, og omkring år 2000 vil næsten halvdelen bo i byområder - de største med befolkningstal omkring 20 millioner. I de industrialiserede landes tidligere mest forurenede byer som London og Los Angeles er der sket væsentlige forbedringer af luftkvaliteten. Samtidig har luftforureningen i de senere år skiftet karakter. Et typisk eksempel er København, hvor tidligere tiders forurening med svovldioxid og sod fra mindre fyringsanlæg i dag er væsentligt reduceret som følge af renere brændsler (herunder naturgas), bedre fyringsteknologi og overgang til fjernvarme produceret på anlæg med røggasrensning og høje skorstene.

Trafikken er imidlertid steget og har medført et udslip af kvælstofoxider, kulilte og kulbrinter, der dog forventes igen at falde med indførelse af katalysatorer. Anvendelsen af blyadditiver i benzin, og dermed en afgørende kilde til blyforurening er stort set ophørt; til gengæld er benzinenes sammensætning ændret, og det har givet risiko for nye forureninger.

En række sundhedsskadelige stoffer (herunder nogle kræftkaldende) er konstateret i byluften, men man har ikke tidsserier, der kan belyse en udvikling. Mange af disse stoffer har sikkert været der hele tiden - blot med andre kilder, fx brændefyr.

I udviklingslandenes storbyer er situationen blandet, men generelt synes historien med

stigende forurening som følge af vækst og industrialisering at gentage sig her. Mange byer har nu nået samme luftforureningsniveau, som man så i London i 1950'erne.

## Langtransport

De fleste luftforurenende stoffer har levetider i atmosfæren på flere dage eller mere. Det betyder, at de kan spredes over områder af størrelsesordenen hele Europa. Forsøg på at løse lokale forureningsproblemer gennem spredning fra høje skorstene medførte på denne måde, at problemerne rykkede op i skala med forsuring og skovdød som resultat.

Man har beregnet svovludslip i Europa siden 1880 og på basis heraf vurderet den tilsvarende svovlforurening. I perioden 1880-1980 steg svovludslippet til omkring 10 gange så meget, dog med midlertidige afdæmpninger under verdenskrigene og krisen i 1930'erne. Siden 1980 er forureningen igen faldet som følge af internationale aftaler om udslipsbegrænsninger, men svovlafsætningen ligger dog stadig i mange områder over, hvad naturen kan tåle.

Udslippet af kvælstofoxider, der ligeledes kan give anledning til forsuring, er også steget drastisk, men forsøg på en begrænsning er endnu ikke slået afgørende igennem. En væsentlig årsag hertil er den voksende vejtrafik, der som gennemsnit for Europa er ansvarlig for op mod halvdelen af udslippet.

Efter 2. Verdenskrig har udslip af ammoniak fra landbrug fået stigende betydning, og siden 1980 har det globale udslip været større end udslippet af kvælstofoxider. Ammoniak vil i første omgang kunne gøre ned-

børen mindre sur, men vil alligevel, gennem efterfølgende reaktioner i jorden, kunne bidrage til forsuringen.

## Ozon på ondt og godt

Foruden den direkte forurening fra trafik optrådte fra midten af 1940'erne en ny type forurening, den såkaldte fotokemiske smog, der opstår, når kvælstofoxider og kulbrinter reagerer under indflydelse af sollys og bl.a. danner ozon. Fænomenet blev først observeret i Los Angeles og ses nu også i en række midt- og sydeuropæiske byer. I Nord-europa er der fortrinsvis tale om langtransporteret forurening med de højeste niveauer i landlige områder. Generelt synes ozonniveauerne at være blevet fordoblet de sidste 100 år. Sideløbende med væksten i den lavtliggende ozon, der har skadelige virkninger på menneskeligt helbred og vegetation, observerede man en nedbrydning af det ozonlag i stratosfæren, som beskytter os mod for meget skadelig UV-stråling. Årsagen hertil viste sig at være CFC-forbindelser. Da de er meget stabile, havde de fået en række industrielle anvendelser. Netop denne stabilitet medførte, at stofferne kunne nå at blive opblandet i stratosfæren. Den betyder også, at selvom brugen af CFC er under hastig afvikling, vil det vare mange år, før situationen er normaliseret.

## Drivhuseffekten

Sammenhængen mellem atmosfærens indhold af kuldioxid og jordens klima gennem den såkaldte drivhuseffekt har været kendt siden midten af forrige århundrede, men det er først i de sidste 10 år, at der har været politisk og videnskabelig forståelse for den menneskelige påvirkning og problemets omfang.

I alt væsentligt hænger hele argumentationen endnu på en række komplicerede modelberegninger. I et "business as usual" scenario forøges udslippet af kuldiioxid med faktor 3, og koncentrationen i atmosfæren fordobles frem til år 2100. Det kan medføre en global temperaturstigning på 2 °C og en stigning i havenes vandstand på 50 cm frem mod år 2100.

En stabilisering af atmosfærens CO<sub>2</sub>-koncentration på 550 ppm (omkring det dobbelte af det, man havde før industrialiseringen) vil først kunne opnås omkring år 2150, hvis udslippene bremses op i løbet af det næste århundrede og derefter gradvis reduceres til en fjerdedel af det, vi har i dag. Det er ikke noget beskedent mål! I FN's klimakonvention, der blev undertegnet i Rio de Janeiro i 1992, synes man også at have set i øjnene, at klimaændringer næppe helt kan undgås, men skal forsinkes mest muligt, således at der kan ske en løbende tilpasning både af natur og menneskelige aktiviteter.

Hidtil har det været I-landene, der gennem deres energiforbrug har haft hovedansvaret for den forøgede drivhuseffekt, men der vil i stigende grad blive tale om et U-landsproblem. Dels fordi U-landene har den største vækst i befolkningstal og levestandard, dels fordi deres primitive infra-

strukturer er mere følsomme over for klimaændringer. Det afgørende er derfor ikke om I-landene opnår nogle - i realiteten arbitrære - delmål for udslipsreduktioner; selvom det selvfølgelig kan have en moralsk betydning.

*Afgørende er det derimod, at der bliver udviklet en teknologi, som kan anvendes i U-landene, så de kan få en rimelig levestandard - uden samtidig at lave så meget forurening, som I-landene har været vant til.*

Af samme betydning er det, at den globale befolkningstilvækst bliver bremsset.

## De generelle sammenhænge

Der er en voksende - ikke alene videnskabelig, men også politisk - erkendelse af, at alle disse fænomener hænger sammen. Under Genevekonventionen forhandles således om en protokol om forsuring, eutrofiering og fotokemisk luftforurening. Den skal danne grundlag for en økonomisk effektiv bekæmpelsesstrategi. En tilsvarende, men knap så integreret, indsats over for globale problemer forsøges under Montrealprotokollen og Klimakonventionen.

Tegneserie-strip af E. Graabæk i BT.



Listen indeholder både litteratur, som er baggrundsmateriale for denne rapport, og forslag til supplerende læsning. Enkelte mere specielle referencer er angivet i teksten.

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 morgon. Jordbruksdepartementet, Stockholm. 231 s.

Barrett, K. et al. 1995. European Transboundary Acidifying Air Pollution. Ten years calculated fields and budgets to the end of the first Sulphur Protocol. EMEP/MS-CW Report 1/95. MSC-W, Oslo. Var pag. (Der udsendes årlige rapporter i samme serie).

Bernes, C. (red.) 1993. 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. 1988. 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.

Dansgaard, V. 1989. Klima, vejr og menneske. Geografforlaget, Brenderup. 128 s.

European Environment Agency 1997. I løbet af sommeren 1997 udkommer to relevante rapporter: Air Pollution in Europa og Air and Health.

Energiministeriet 1993. Energi 2000 - opfølgningen. En ansvarlig og fremsynet energipolitik. Energiministeriet, København, 41 s.

Fenger, J. Kronikker i Politiken :  
Kuldioxid i en højere sfære. 27.10.1992  
Stenkulsskyer. 9.04.1995  
Ozonmysteriet. 19.12.1995  
Krig om klimaet. 4.09.1996

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., Jørgensen, A.M.K., Halsnæs, K. (red.) 1996. Drivhuseffekt og klimaændringer. Betydningen for Danmark set i lyset af IPCC's 1996-rapporter. Miljøstyrelsen, København. 151 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.

Hyltoft, 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. (red.)* 1996. Fremtidens klima. Danmarks Meteorologiske Institut, København. 45 s. (Dansk oversættelse af en kortfattet version af IPCC's seneste klimarapport).
- 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.
- Miljø- og Energiministeriet* 1996. Energi 21. Regeringens energihandlingsplan 1996. Miljø- og Energiministeriet, København. 76 s.
- Mylona, S.* 1993. Trends of sulphur dioxide emissions, air concentrations and depositions of sulphur in Europe since 1880. EMEP/MSC.W Report 2/93. Norsk Meteorologisk Institut, Oslo. 35 s. med bilag. (Senere offentliggjort i Tellus (1996), vol. 48B, 662-689).
- Möller, L. (red.)* 1990. Stadsluften. En bok om luften i våre tätorter. Naturvårdsverket, Stockholm, 150 s.
- 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, vol 92, 13-28.
- Ponting, C.* 1991. En grøn verdenshistorie. Schønberg, 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.
- Vesselbo, E. m.fl. (red.)* 1994. Tal om natur og miljø. Danmarks Statistik, Miljøstyrelsen, Skov- og Naturstyrelsen. 235 s.
- Wieringa, K. (red.)* 1995. Environment in the European Union 1995. Det europæiske Miljøagentur, København. 151 s.

## Danmarks Miljøundersøgelser

---

Danmarks Miljøundersøgelser - DMU - er en forskningsinstitution i Miljø- og Energi- ministeriet. DMU's opgaver omfatter forskning, overvågning og faglig rådgivning inden for natur og miljø.

Henvendelser kan rettes til:

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

Danmarks Miljøundersøgelser  
Postboks 358  
Frederiksborgvej 399  
4000 Roskilde  
Tlf. 4630 1200  
Fax 4630 1114

Direktion og Sekretariat  
Forsknings- og Udviklingssektion  
Afd. for Atmosfærisk Miljø  
Afd. for Havmiljø og Mikrobiologi  
Afd. for Miljøkemi  
Afd. for Systemanalyse

Danmarks Miljøundersøgelser  
Postboks 314  
Vejlsovej 25  
8600 Silkeborg  
Tlf. 8920 1400  
Fax 8920 1414

Afd. for Vandløbsøkologi  
Afd. for Sø- og Fjordøkologi  
Afd. for Terrestrisk Økologi

Danmarks Miljøundersøgelser  
Grenåvej 12, Kalø  
8410 Rønne  
Tlf. 8920 1700  
Fax 8920 1514

Afd. for Landskabsøkologi  
Afd. for Kystzoneøkologi

Danmarks Miljøundersøgelser  
Tagensvej 135,4  
2200 København  
Tlf. 3582 1415  
Fax 3582 1420

Afd. for Arktisk Miljø

### Publikationer:

DMU udgiver faglige rapporter, tekniske anvisninger, temarapporter samt årsberetninger. Et katalog over DMU's aktuelle forsknings- og udviklingsprojekter er tilgængeligt via World Wide Web. I årsberetningen findes en oversigt over det pågældende års publikationer.

---

## Tidligere TEMA-rapporter fra DMU:

- |            |   |             |   |
|------------|---|-------------|---|
| Nr. 1/1994 | <b>Kvælstoftilførsel til Limfjorden</b><br><i>Brian Kronvang m.fl.</i><br>16 sider, kr. 50,-                                      | Nr. 7/1996  | <b>Naturens tålegrænser for luftforurening</b><br><i>Morten Strandberg og Lisbeth Mortensen.</i><br>40 sider, kr. 60,-                  |
| Nr. 2/1994 | <b>Luftforurening i danske byer</b><br><i>Kåre Kemp og Finn Palmgren Jensen.</i><br>41 sider, kr. 100,-                           | Nr. 8/1996  | <b>Anskydning af vildt</b><br><i>Henning Noer, Jesper Madsen, Helmuth Strandgaard og Poul Hartmann.</i><br>52 sider, kr. 80,-           |
| Nr. 3/1995 | <b>Ozon som luftforurening</b><br><i>Jes Fenger.</i><br>48 sider, kr. 80,-  | Nr. 9/1996  | <b>Kvælstofbelastning af havmiljøet</b><br><i>Henrik Paaby og Flemming Møhlenberg.</i><br>40 sider, kr. 60,-                            |
| Nr. 4/1996 | <b>Tungmetaller i danske jorder</b><br><i>John Jensen, Jesper Bak og Martin M. Larsen.</i><br>40 sider, kr. 100,-                 | Nr. 10/1996 | <b>Havets usynlige liv</b><br><i>Åke Hagström, Torkel Gissel Nielsen, Jens Kjerulf Petersen og Thomas Forbes.</i><br>33 sider, kr. 50,- |
| Nr. 5/1996 | <b>Forureningsbekæmpelse med mikroorganismer</b><br><i>Ulrich Karlson, Niels Kroer og Pia A. Willumsen.</i><br>32 sider, kr. 30,- |             |   |
| Nr. 6/1996 | <b>Status og jagttider for danske vildtarter</b><br><i>Jesper Madsen m.fl.</i><br>112 sider, kr. 110,-                            |             |   |

De enkelte hæfter i serien "TEMA-rapport fra DMU" beskriver resultaterne af DMU's forskning inden for et afgrænset område. Rapporterne er skrevet på letforståeligt dansk og henvender sig til alle, der er interesseret i miljø og natur. Serien er udformet så den kan bruges i undervisningen i folkeskolens ældste klasser og i gymnasiet.