

# CO<sub>2</sub> Hvorfra, hvorfor, hvor meget ?

---

Jes Fenger

*Afdeling for Atmosfærisk Miljø*

Miljø- og Energiministeriet  
Danmarks Miljøundersøgelser  
2000

TEMA-rapport fra DMU, 31/2000  
CO<sub>2</sub> - Hvorfra, hvorfor, hvor meget?

Forfatter: Jes Fenger, Afdeling for Atmosfærisk Miljø, Danmarks Miljøundersøgelser.

Udgiver: Miljø- og Energiministeriet, Danmarks Miljøundersøgelser ©  
URL: <http://www.dmu.dk>  
Udgivelsestidspunkt: Januar 2000

Layout, illustrationer og produktion: Britta Munter, Grafisk Værksted, DMU, Roskilde  
Omslagsfoto: Biofoto/Niels Peter Holst Hansen

Gengivelse tilladt med tydelig kildeangivelse

Tryk: Scanprint, ISO 14001 Miljøcertificeret, EMAS miljøregistreret DK-S-0015.  
ISO 9002 kvalitetsgodkendt. Papir: Cyclus Print, 100% genbrugspapir med vegetabiliske trykfarver uden opløsningsmidler. Omslag lakeret med vandbaseret vegetabilisk lak.



Sideantal: 40  
Oplag: 2.000

ISSN (trykt udgave): 0909-8704  
ISSN (elektronisk udgave): 1399-4999  
ISBN: 87-7772-526-3

Pris kr. 40,-. Klassesæt á 10 stk. kr. 300,-. Abonnement (5 numre) kr. 225,-  
(Alle priser er incl. 25% moms, excl. forsendelse)  
Rapporten udgives desuden som PDF-fil på Danmarks Miljøundersøgelsers hjemmeside.

Købes i boghandelen eller hos:

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

Miljøbutikken  
Information & bøger  
Læderstræde 1-3  
1201 København K  
Tel: 3395 4000  
Fax: 3392 7690  
E-mail: [butik@mem.dk](mailto:butik@mem.dk)  
URL: [www.mem.dk/butik](http://www.mem.dk/butik)

# Indhold

Forord .....	4
Den videnskabelige baggrund	
Jordens historie .....	6
Stofkredsløb .....	8
Kulstofs fysik og kemi .....	10
Reservoirer og stofstrømme .....	12
De naturlige kulstofkredsløb .....	14
De sidste par hundrede tusinde år .....	16
Den menneskelige påvirkning	
Det nuværende globale kulstofkredsløb .....	18
Den forøgede drivhuseffekt .....	20
Danmarks bidrag .....	22
Hvad skal og kan vi gøre - rent teknisk?	
Scenarier for fremtiden .....	24
Begrænsning af udslip .....	26
Oplagring og anvendelse .....	28
De politiske muligheder	
I-lande, U-lande og overgangsøkonomier .....	30
Fra "Vores fælles fremtid" til "Klimakonventionen" .....	32
Kyoto-aftalen og derefter .....	34
Konklusion .....	36
Litteratur .....	38
Danmarks Miljøundersøgelser .....	39
Tidligere TEMA-rapporter fra DMU .....	40



# Forord

## Problemstilling

Tidens måske alvorligste miljøproblem er den forøgede drivhuseffekt, dens påvirkning af Jordens varmebalance og den deraf følgende risiko for globale klimaændringer. Hovedsynderen er gassen kuldioxid eller - som oftest omtalt med den kemiske formel -  $\text{CO}_2$ , der dannes og udsendes ved næsten enhver form for forbrænding. Globalt set dækker de kulstofbaserede fossile brændsler ca. 3/4 af vores energibehov og biobrændsler en stor del af resten. Udslippet af  $\text{CO}_2$  er derfor snævert knyttet til produktion af energi, men også andre forhold som ændringer i arealanvendelse og industrielle aktiviteter spiller en rolle.

Kuldioxid er imidlertid en ganske almindelig kemisk forbindelse, der altid har været i atmosfæren. Og den spiller en afgørende rolle i de fleste geologiske og biologiske processer, hvor den indgår med større mængder end dem, der kommer fra menneskelige aktiviteter.

## Rapportens baggrund

Det er derfor ikke overraskende, at der i den offentlige debat ofte kommer spørgsmål af typen: "Når nu  $\text{CO}_2$  er så væsentlig, og når de  $\text{CO}_2$ -udslip, som menneskene er ansvarlige for, kun udgør få procent af de naturlige udslip, hvorfor skal vi så bekymre om den sag?"

Sådanne spørgsmål kan selvfølgelig affærdiges med en henvisning til, at atmosfærens indhold af  $\text{CO}_2$  faktisk *er* steget ca. 30% siden industrialiseringen tog fart i det 19. århundrede. Men en egentlig forståelse af stigningen kræver en indsigt i, hvordan de globale stofkredsløb virker. Uden denne indsigt kan man heller ikke forstå, hvorfor det er så væsentligt, så vanskeligt og så langvarigt at få bremsset udviklingen.

Det centrale er her, at der er tale om et samspil mellem fænomener med vidt forskellige tidshorisonter - spændende fra geologiske processer gennem årmillioner, over en teknologisk og samfundsmæssig udvikling de næste par hundrede år, til den politiske dagligdag, der ofte er karakteriseret ved længden af en valgperiode.



## Rapportens afgrænsning

Det er i praksis umuligt at måle mængden af samtlige grundstoffer i alle deres forbindelser, og de opgørelser, der findes, er derfor ofte meget usikre. Sædvanligvis fremkommer de angivne tal ved en sammenstilling af målinger og beregninger. De må følgelig altid tolkes med forsigtighed, og de bliver til stadighed revideret. Hertil kommer, at de forskellige grundstoffers kredsløb er koblet sammen, fordi stofferne i mange tilfælde indgår i de samme kemiske forbindelser, der reagerer med hinanden.

Uden helt at se bort fra disse komplikationer forsøger denne temarapport i overskuelig form at beskrive kulstoffets globale kredsløb, der er det vigtigste og det mest komplicerede i naturen. Specielt besvares spørgsmålene:

- *Hvor kommer CO<sub>2</sub> fra?*
- *Hvad bestemmer mængden af CO<sub>2</sub> i atmosfæren?*
- *Og hvad kan vi gøre for at regulere den?*

De seneste politiske og tekniske bestræbelser sigter imidlertid mod en samlet begrænsning af den effektive drivhuspåvirkning. Derfor er det også nødvendigt kort at omtale de andre såkaldte drivhusgasser, der samlet er ansvarlige for omkring en tredjedel af den menneskeskabte forøgelse af drivhuseffekten. Dette gælder især metan (CH<sub>4</sub>), der indgår direkte i kulstofkredsløbet.

Selve drivhuseffekten og dens betydning for Jordens klima samt virkningerne på mennesker og natur af eventuelle klimaændringer nævnes kun i det omfang, der er en tilbagevirkning på udslippet af kuldiioxid.

## Baggrundsmateriale

En grundigere behandling af hele problemstillingen kan findes i den litteratur, som er angivet side 38. En ganske kort fremstilling, der sætter klimaproblemet i relation til andre luftforureningsproblemer, kan findes i TEMA-rapport fra DMU 11/1997: En atmosfære med voksende problemer.

I teksten henvises til den generelle litteratur med forfatternavn og årstal. Mere specielle henvisninger er kun givet i teksten. Bemærk, at der så vidt muligt benyttes de originale enheder. Omregningsfaktorer er angivet.

En kortfattet version af den foreliggende rapport er samtidigt udsendt som FAKTUELT fra Miljø- og Energiministeriet og kan findes på internettet under adressen:

<http://www.mem.dk/faktuelt/>

*"Mit råd er: Opsæt aldrig til i morgen, hvad du kan gøre i dag. Opsættelse stjæler din tid! Tag tiden i krebsen!"*

*"Mit andet råd kender De, Copperfield," sagde så Mr. Micawber. "Årsindtægt tyve pund, årlige udgifter tyve-nul-seks, facit: Ulykke. Blomsten svides af, løvet visner, Dagens Gud går ned over det trøstesløse landskab og - kort sagt, man er slået i gulvet for stedse. Som jeg er!" For at gøre sit eksempel mere virkningsfuldt drak Mr. Micawber med største nydelse og tilfredshed et glas punch og fløjtede Studentens Hornpipe.*

*Fra Charles Dickens: David Copperfield (1850)  
Oversat af Eva Hemmer Hansen.  
(Tegning af „Phiz“).*

# Jordens historie

## Solsystemets oprindelse

Solsystemet er sandsynligvis små 5 milliarder år gammelt og blev dannet af en interstellar sky, der faldt sammen ved sin egen tyngdekraft. Skyen roterede og blev fladtrykt, hvorefter materialet efterhånden samlede sig med en sol i centrum og planeter i voksende afstand. Først efter at planeterne var dannet, begyndte Solen at skinne, og dens energiudstråling er langsomt vokset. I den tid, der har været liv på Jorden, har Solen øget sin varmeafgivelse med 25%.

## Den tidlige jord og atmosfære

I sin tidlige historie gennemgik Jorden en række temperaturændringer - bl.a. som følge af opvarmning ved sammenstød med - og dermed opsamling af materiale fra - andre mindre himmellegemer. Først da det egentlige bombardement af asteroider ophørte, dannedes en stabil jordskorpe. Nu er Jorden næsten kugleformet med en radius på ca. 6400 km, kun en smule fladere ved polerne som følge af rotationen. Sollyset er efterhånden blevet den altdominerende energikilde; under 1% af den energi, der holder Jorden varm, kommer fra dens indre.

I den første del af Jordens liv var der megen vulkansk aktivitet, der medførte udsendelse af en række gasarter. Herved opstod atmosfæren, der til at begynde med bestod af vanddamp ( $H_2O$ ), ammoniak ( $NH_3$ ), kulilte ( $CO$ ), kuldioxid ( $CO_2$ ) og kvælstof ( $N_2$ ); derimod var der ingen ilt ( $O_2$ ). Efterhånden som Jorden kølede ned, fortættes vanddampen, og oceanerne opstod.

## Betydningen af liv

Livet er opstået i havet, og de ældste sikre spor var indtil for nylig nogle ca. 3,5 milliarder år gamle bakteriellignende celler fra Vestaustralien. Nu synes fund af biologisk dannet kulstof i bjergarter på Grønland at have rykket tidspunktet 2-300 millioner år tilbage i tiden (Rosing, 1999). De første iltdannende organismer optrådte omkring en halv milliard år senere, og fra det tidspunkt begyndte livet så småt at påvirke Jordens udvikling.

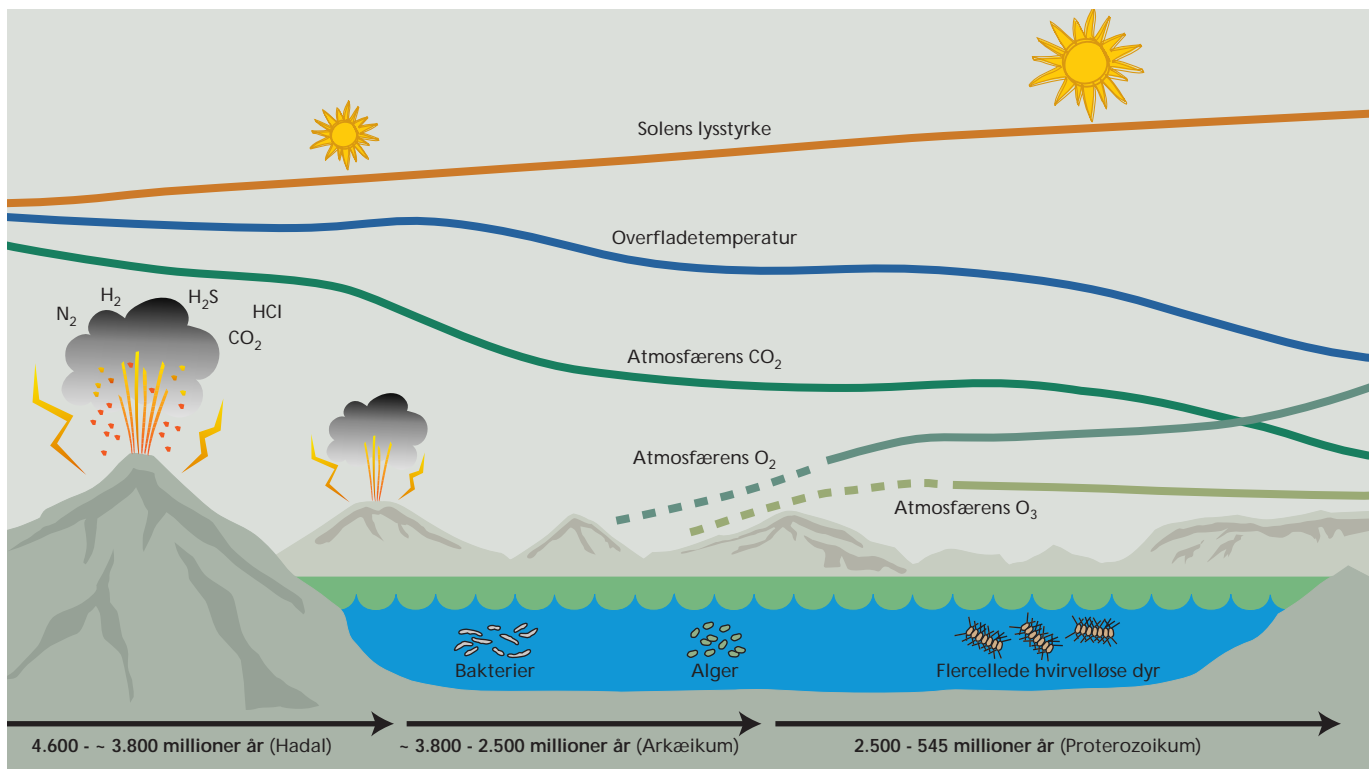
Den først dannede iltforbandt sig med jern i oceanerne, men efterhånden som jernet blev brugt op, blev ilt tilført atmosfæren. For godt en halv milliard år siden opstod de flercellede organismer og derefter - i høj grad betinget af mængden af ilt - organismer med skal.

For ca. to milliarder år siden var atmosfærens iltindhold vokset til 1% af det det er nu, og efterhånden dannedes det ozonlag, som nu skærmer Jorden mod biologisk skadelig kortbølget UV-stråling. Dermed var vejen banet for liv på kontinenterne. Figur 1 viser i meget grove træk denne tidlige udvikling. Med vegetation på jord kom en forstærket produktion af ilt via de grønne planters fotosyntese. For ca. 300 millioner år siden var atmosfærens nuværende iltindhold på ca. 20% nået.

De flercellede organismer medførte geologiske aflejringer af kul, olie og gas, ligesom store dele af Jordens kalksten er af biologisk oprindelse. Disse aflejringer medførte, at atmosfærens indhold af kuldioxid efterhånden blev reduceret til nogle få hundrede milliontedele (ppm). Herved har



Foto: WMO



Jorden fået en atmosfære, der afviger væsentligt fra den, der er på dens to nærmeste naboer Mars og Venus. Generelt set opretholdes i Jordens atmosfære - netop på grund af tilstedeværelsen af liv - en blanding af både iltende og reducerende kemiske forbindelser. Uden liv ville disse stoffer reagere med hinanden, indtil der var opnået kemisk ligevægt.

## Menneskets påvirkning

En enkelt dyreart, mennesket, har imidlertid i nyere tid haft en sådan succes, at dens påvirkning af det samlede system truer med at gå ud af kontrol. Egentlige kultursamfund opstod først med agerbruget for omkring 10.000 år siden, og verdensbefolkningen var da antagelig omkring 5 millioner. Indtil industrialiseringen og den forbedrede hygiejne i det 19. århundrede steg tallet langsomt til en milliard, men så be-

gyndte det at gå hurtigt med to milliarder i begyndelsen af det 20. århundrede. Stigende levestandard og opfindelsen af antibiotika medførte en ny fordobling til fire milliarder omkring 1970, og der vil næsten uundgåelig ske endnu en fordobling til 8 milliarder omkring år 2020. Nogle prognoser forudser, at befolkningen derefter vil stabiliseres omkring 10 milliarder.

Støttet af den teknologiske udvikling har den voksende verdensbefolkning medført en endnu større stigning i produktionen af fødevarer og industriprodukter. Alene siden 2. Verdenskrig er det globale energiforbrug steget med næsten en faktor 5. Da hovedparten af denne energi er blevet fremstillet ved hjælp af fossile brændsler og mindre mængder biobrændsler, er udslippet af kuldioxid, der er slutproduktet ved forbrænding, steget tilsvarende.

Figur 1. Jordens historie i meget grove træk indtil for omkring 1/2 milliard år siden (Efter Mackenzie, 1998).

Mindre variationer i CO<sub>2</sub>-koncentrationen inden for de sidste par hundred tusinde år er vist på figur 9, side 16.



# Stofkredsløb

Vores fysiske verden - og herunder Jorden og atmosfæren - er opbygget af atomer. De indgår i forskellige molekyler, der kan optræde frit som gasser eller som flydende eller faste stoffer. Nogle få naturligt forekommende atomer er radioaktive og kan omdannes til andre, atmosfæren kan tabe nogle lette gasser til verdensrummet, og der kan komme noget stof ind i form af meteoritter. Men *i alt væsentligt* er det hele tiden de samme atomer, der optræder i luften, i vandet og i den faste Jord.

De skifter bare plads og kemisk og fysisk form, gennem en række reaktioner, der samlet udgør såkaldte *stofkredsløb*.

## Nogle vigtige begreber

Ved beskrivelsen af stofkredsløb benytter man bl.a. følgende begreber:

Et *reservoir* er den stofmængde, der findes i fx en sø, i havet eller i hele atmosfæren.

En *kilde* er en aktivitet eller et fænomen, der giver anledning til afgivelse af stof. Kilder kan være både naturlige som fx vulkaner eller skovbrande og menneskeskabte som fx biler eller gødningsanvendelse.

Tilsvarende optager *dræn* stof. I beregninger bliver dræn, der fx kan være voksende skove, ofte beskrevet som negative kilder. En *stofstrøm* eller *flux* er den stofmængde, der per tidsenhed transporteres mellem enkelte reservoirer. For konkrete kilder benyttes ofte betegnelserne *emission* eller *udslip*.

*Omsætningstiden* af et givet stof i et givet reservoir er stofmængden i reservoiret divideret med stofstrømmen - altså groft taget et stofs gennemsnitlige levetid i reservoiret.

## Et simpelt billede

Man kan i visse henseender sammenligne stofkredsløb med økonomiske kredsløb. Tænk fx på en lille privatøkonomi, og lad os forenkle den ved at se bort fra renter, skatter og den slags (figur 2). Man har en indtægt og nogle udgifter (det svarer til stofstrømme). Man kan også have nogle penge anbragt forskellige steder: Som kontanter, på bankkonti, som værdipapirer, eller pensionsopsparinger osv. (det svarer til reservoirer). Pengene bevæger sig rundt i systemet med større eller mindre hastighed. Og der kan som bekendt udmærket være store hurtige omsætninger (store stofstrømme) med indtægter og udgifter og meget langsommere overførsler mellem fx en lønkonto og en opsparingskonto. Små ubalancer kan her over længere tidsrum give sig afgørende udslag.

*Figur 2.* Forenklet privat del af et økonomisk kredsløb. Der sker en stor, hurtig gennemstrømning i checkkontoen og en langsom opsparing på bankbogen. I praksis vil der som bekendt ofte ske det, at en opsparing overføres til andre aktiver eller frister til et øget forbrug, således at kontoens beholdning efter nogen tid stabiliseres på et højere niveau.





## - og den virkelige verden

Selvom atmosfærens sammensætning gennem Jordens historie har undergået store ændringer, har den over kortere perioder været tilnærmelsesvis konstant. Det betyder dog ikke, at det hele tiden er de samme molekyler, der har været til stede, men at tilstanden er blevet opretholdt ved, at tilførsel og tab har været i ligevægt, således at reservoirbeholdningerne - og dermed koncentrationerne - af de enkelte forbindelser ikke er blevet ændret.

Dette er ikke mere tilfældet. Forskellige menneskelige aktiviteter har således over en kort årrække ændret atmosfærens indhold af bl.a. drivhusgassen CO<sub>2</sub>. Interessen for stofkredsløb er derfor ikke alene rent videnskabelig, men også begrundet i miljømæssige forhold og et behov for en vurdering af virkningerne af eventuelle indgreb. Det kræver viden om stoffernes transport og omdannelse både i atmosfæren og mellem atmosfæren og jord og vand.

## Vekselvirkninger

Kredsløbene for de enkelte grundstoffer griber ind i hinanden. Specielt gælder det i *atmosfæren*, hvor nogle stoffer optræder i mange sammenhænge. Fx indgår ilt i forskellige former i stort set alle reaktioner. Sammenhængen kan også opstå gennem fælles reaktanter. Fx spiller OH-radikaler, der dannes ved fotokemiske reaktioner (se fx Fenger, 1995), en afgørende rolle i atmosfærekemien. Hvis ét stof optræder i store mængder, kan det derfor gennem forbrug af OH påvirke omdannelsen af et helt andet stof. Fx synes levetiden af metan at vokse med det generelle forureningsniveau.

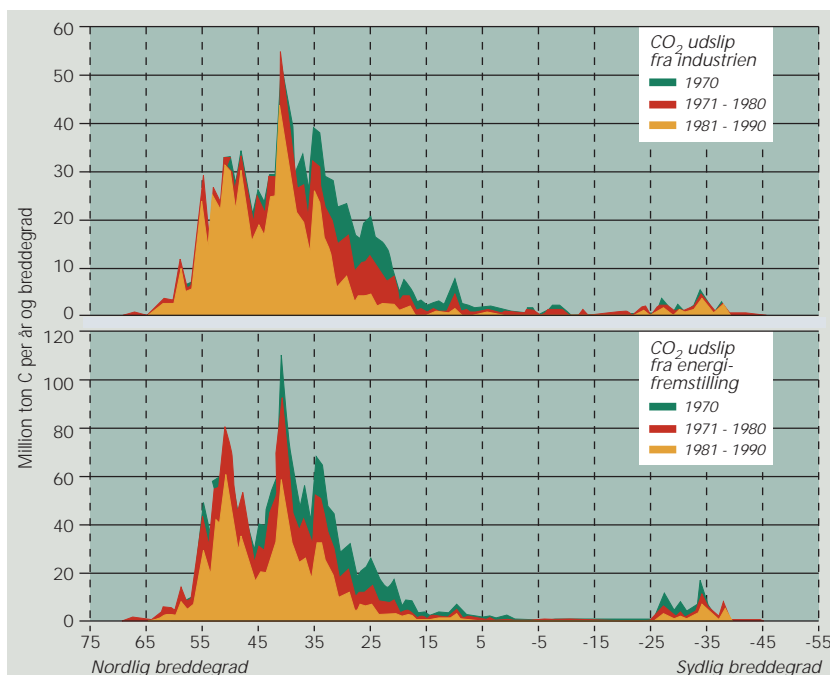
## Geografiske og tidsmæssige skalaer

I praksis er de globale stofkredsløb (og økonomiske kredsløb) derfor langt mere udviklede, end det fremgår af figur 2. Det skyldes ikke alene de sideløbende og konkurrerende reaktioner, men også at reaktionerne sker fordelt i tid og rum. Tidsmæssigt er der, som før nævnt, tale om variationer over hele Jordens levetid. Rumligt spænder skalaen fra fx enkelte biologiske organismer til hele kloden. På grund af det globale vindsystem (se fx Fenger og Tjell, 1994), der er opdelt i celler, tager en opblanding over ækvator flere år. Det betyder, at den nordlige og den sydlige halvkugles lufthav er delvis isolerede fra hinanden. Da der er langt mere landområde og flere industrialiserede lande på den nordlige halvkugle end på den sydlige, bliver de to halvkugler i forureningsmæssig henseende på mange måder forskellige (figur 3). Som vi skal se senere afspejler det sig også på kort sigt i kulstofs kredsløb.

Figur 3.

Verdens samlede udslip af CO<sub>2</sub> (udtrykt som kulstof) i perioden 1970-1990 fordelt på breddegrader. Fordelingen afspejler klart, at de industrialiserede lande altovervejende ligger på middelhøje breddegrader på den nordlige halvkugle. Andre luftforurenende stoffer har lignende fordelinger.

(Efter Change 36, maj-juni 1997).



# Kulstofs fysik og kemi

Selvom kulstof kun udgør mindre end 1% af Jorden og kun 0,27% af jordskorpen, er det afgørende for livet. Alle mikroorganismer, planter og dyr er baseret på kulstofforbindelser, og en forståelse af kulstofs kredsløb, der først blev beskrevet af den tyske kemiker Justus v. Liebig i 1840, er derfor af fundamental betydning for en forståelse af alle processer i biosfæren. Omvendt har livet afgørende påvirket atmosfærens indhold af kulstofforbindelser - specielt  $\text{CO}_2$ , og det har gennem hele Jordens historie bidraget til at stabilisere klimaet på et niveau egnet for liv - bl.a. gennem en varierende drivhuseffekt.

Ved normalt tryk og temperatur er  $\text{CO}_2$  en farveløs, lugtfri gas. I høje koncentrationer kan den virke kvælende, men den er under normale betingelser helt ugiftig.

De fleste andre stoffer går fra fast, over flydende til luftform, når de opvarmes ved normalt tryk. Fast kuldioxid (tøris) vil derimod ved 1 atmosfæres tryk og  $-78,5^\circ\text{C}$  sublimere dvs. gå direkte til luftform. Kuldioxid på flydende form kan kun eksistere ved tryk over godt 5 atmosfære (figur 4). Over det kritiske punkt ca.  $31^\circ\text{C}$  og 73 atmosfære kan man ikke skelne mellem gasformig og flydende  $\text{CO}_2$ . Disse egenskaber har betydning i forbindelse med eventuel oplagring af  $\text{CO}_2$  (se side 29).

Figur 4. Såkaldt fase-diagram for  $\text{CO}_2$ . Diagrammet viser ved hvilke kombinationer af tryk og temperatur stoffet er henholdsvis fast, flydende eller på gasform. Bemærk at skalaerne er forvrængede, værdierne er afrundede og temperaturen angivet i K.

## Kuldioxid

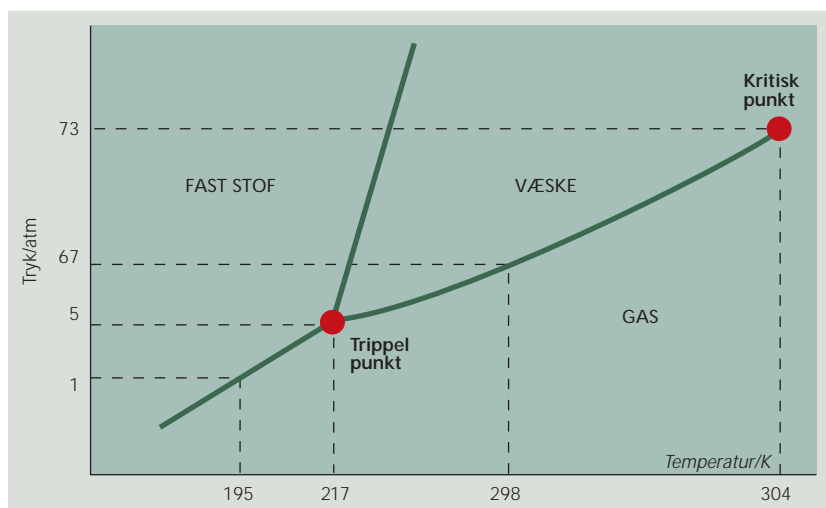
Et kuldioxidmolekyle består, som navnet antyder af et kulstofatom og to ilt(oxygen)-atomer, der ligger på linie: O-C-O.

Denne struktur gør at  $\text{CO}_2$  kan absorbere infrarød (varme) stråling og dermed virke som drivhusgas.

## Kulstofforbindelser og omsætningstider

Kulstof indgår i langt flere kemiske forbindelser end andre grundstoffer; og en mængde af disse har miljømæssig betydning. Derfor er det samlede globale kredsløb ikke enkelt, men består af en række koblede delkredsløb, der har ændret sig under udviklingen af Jorden og dens atmosfære. Det er følgelig heller ikke muligt at angive en enkelt omsætningstid.

Kemiske forbindelser, der er meget reaktive, har korte levetider i atmosfæren - måske helt ned til minutter. Sæsonvariationer i Jordens vegetation giver små variationer i atmosfærens  $\text{CO}_2$ -indhold med perioden et år. Tilsvarende variationer kan skyldes større naturlige begivenheder. De kan være mere eller mindre periodiske som "El Niño" (side 17), der er knyttet til store havstrømme. Små, mere lokale bidrag optræder helt tilfældigt som fx vulkanudbrud eller skovbrande.



Forholdet mellem mængden af kulstof i atmosfæren og fluxen er ca. 4 år, det er den tid et CO<sub>2</sub>-molekyle i gennemsnit opholder sig i atmosfæren. De geokemiske kredsløb, der kan oplagre kulstof mere permanent, har langt længere omsætningstider.

Når man skal vurdere menneskeskabte klimaændringer er det mest interessante imidlertid den samlede effektive tid, der karakteriserer atmosfærens reaktion på et kortvarigt input. Her regner man for CO<sub>2</sub> med 50-200 år. Derfor kan menneskelige aktiviteter påvirke atmosfærens indhold af kulstofforbindelser, der i de sidste par hundrede år har ændret sig hurtigere end det tilsyneladende nogensinde tidligere har været tilfældet.

## Stabile isotoper

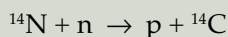
Kulstof har to stabile isotoper <sup>12</sup>C (forekomst 98,9%) og <sup>13</sup>C (1,1%), hvis forbindelser opfører sig lidt forskelligt. <sup>13</sup>CO<sub>2</sub> diffunderer lidt langsommere (ca. 4‰) end <sup>12</sup>CO<sub>2</sub> og optages knap så hurtigt ved fotosyntesen (30‰). Derfor vil <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-forholdet i fossile brændsler og i ny biomasse være lidt mindre end i atmosfæren.

I løbet af de sidste 100 år har man observeret et fald i <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-forholdet i atmosfæren (figur 5); det må skyldes, at der sendes "supercarbonat" CO<sub>2</sub> ud i atmosfæren ved forbrænding af fossile brændsler. Bestemmelse af <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-forhold kan også på forskellig anden vis bruges til at belyse de globale kredsløb for kulstofforbindelser, bl.a. fordi fotosyntesen optager den tunge isotop <sup>13</sup>C i CO<sub>2</sub> langsommere end det er tilfældet ved optag i oceanerne.

Andre eksperimentelle metoder udnytter fx at atmosfærens indhold af ilt og kulstof i mange henseender varierer modsat, og man bestemmer derfor ændrede forhold mellem O<sub>2</sub> og N<sub>2</sub> i atmosfæren.

## Radioaktive isotoper

Af de kendte radioaktive isotoper <sup>10</sup>C, <sup>11</sup>C, <sup>14</sup>C og <sup>15</sup>C har kun <sup>14</sup>C med en halveringstid på 5700 år praktisk betydning. <sup>14</sup>C dannes løbende i atmosfæren, ved at kosmisk protonstråling først danner hurtige neutroner, der derefter reagerer med kvælstof:



Det atomare <sup>14</sup>C oxideres til <sup>14</sup>CO<sub>2</sub>, og der opstår herved i princippet en konstant relativ koncentration på omkring 10<sup>-10</sup>‰, der forplanter sig til hele biosfæren.

Når levende materiale dør, ophører optaget af <sup>14</sup>C, og indholdet reduceres med tiden ved radioaktivt henfald. Man kan derfor ved måling af det resterende indhold af <sup>14</sup>C i biologisk materiale bestemme, hvornår det sidst optog CO<sub>2</sub> fra atmosfæren - altså dets alder. Denne såkaldte <sup>14</sup>C-datering er et nyttigt redskab i undersøgelser af planterester, museumsstykker mm., og den kan også benyttes til mere generelt at belyse kulstofs kredsløb. Dateringen vanskeliggøres dog af flere forhold - herunder, at der efter 2. Verdenskrig også er dannet <sup>14</sup>C ved sprængninger af atomvåben og ved drift af atomkraftværker.

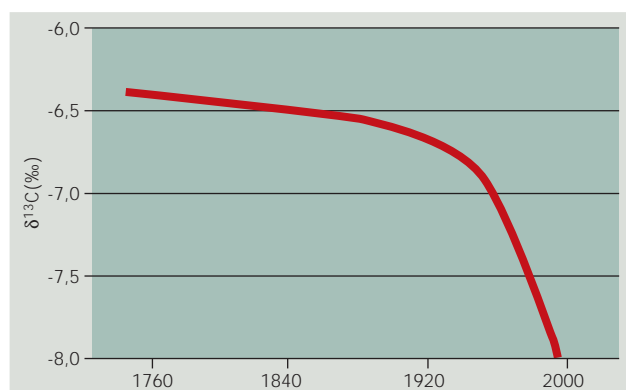
Oprindeligt blev <sup>14</sup>C-datering gennemført som en måling af radioaktivitet. Senere er en langt større nøjagtighed opnået ved direkte bestemmelse af isotoper med atommassespektrometri. I praksis kan en aldersbestemmelse nu udstrækkes til 40-70.000 år.

Figur 5. Ændringer i atmosfærens relative indhold af <sup>13</sup>C i forhold til en standard udtrykkes med størrelsen:

$$\delta^{13}\text{C} = \left[ \frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{prøve}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{standard}}} - 1 \right] \times 10^3 \text{‰}$$

Kurven, der er sammensat af forskellige datasæt viser, at der sker et fald i atmosfærens indhold af <sup>13</sup>C fra midten af forrige århundrede.

(Forenklet efter: Marino og McElroy, Nature 349, 127-131).



# Reservoirer og stofstrømme

Jordens kulstof er groft taget fordelt på tre hovedreservoirer:

- **Den dybere del af Jorden**, der er ret stabil, med et indhold på ca. 1500 mia tons og med en langsom omsætning. Ved vulkanudbrud og nedbrydning af mineraler udsendes kulstofforbindelser, som måske har været begravet i millioner af år.
- **Den geokemiske del** omfatter oceanernes dybere lag (36.000 mia tons) og klippernes kulstofholdige mineraler og kalksten (75 mio. mia tons). Omsætningstiden kan her være hundreder til tusinder af år.

- **En biologisk del** omfattende planter, atmosfæren og oceanernes overfladelag, hver indeholdende 500-700 mia tons. Dyr inkl. mennesker indeholder kun 1-2 mia tons. Systemet er i dynamisk ligevægt med omsætningstider på dage til århundreder. Det er her den menneskeskabte påvirkning sætter ind, men der er en kobling til den dybere del af Jorden gennem udnyttelsen af de fossile brændsler. Grundlæggende er problemet med det menneskeskabte CO<sub>2</sub>-udslip, at stoftransporten fra den dybere del af Jorden til atmosfæren er forøget i forhold til den omvendte deponering. I den økonomiske analogi (figur 2 side 8) svarer det til at indtægten er gået op og delvis sat ind på opsparingskontoen (*atmosfæren*).

Figur 6.  
Møns Klint består af karbonater med organisk oprindelse. Dvs. den indeholder kulstof, der oprindeligt har været i atmosfæren.



Foto: CDanmark

## Delkredsløb og synsvinkler

Det samlede globale kredsløb, der kan opdeles i en geokemisk del og en biologisk del kan ses under flere synsvinkler:

- Udviklingen i løbet af Jordens historie
- De sidste par hundrede års menneskelige forstyrrelse af kredsløbene
- Den resulterende umiddelbare situation
- Og endelig - og måske politisk/økonomisk set mest interessant - den mulige udvikling i fremtiden. Af dominerende interesse på globalt plan er her atmosfærens indhold af kuldioxid og metan, der er de væsentligste drivhusgasser med menneskeskabte kilder. Som bekendt er deres koncentrationer stigende, og det forrykker energibalancen i Jord-



atmosfæresystemet og truer med globale klimaændringer. En forståelse af kulstofs kredsløb er derfor afgørende for en vurdering af, hvordan koncentrationerne kan udvikle sig i fremtiden, og hvordan vi kan påvirke denne udvikling.

## Forekomst i atmosfæren

Atmosfæren indeholder en lang række kulstofforbindelser (tabel 1). I troposfæren, dvs. atmosfærens nederste ca. 15 km, er kuldioxid ( $\text{CO}_2$ ) den vigtigste kulstofforbindelse (mængdemæssigt 99%) med et gennemsnitligt blandingsforhold der i 1996 var 360 ppmv. Efter  $\text{CO}_2$  er der mest metan ( $\text{CH}_4$ ) med 1,7 ppmv, og kulilte ( $\text{CO}$ ) med 0,04 - 0,20 ppmv. Det er kun disse tre forbindelser, der har væsentlig betydning for kulstofkredsløbet. Da  $\text{CH}_4$  og  $\text{CO}$  omsættes til  $\text{CO}_2$  i atmosfæren, vil atmosfærisk kulstof det meste af tiden være i form af  $\text{CO}_2$ .

Desuden optræder i atmosfæren en lang række organiske forbindelser i små koncentrationer. På geografisk mindre skala kan nogle kulstofforbindelser være luftforureninger - både ved at være giftige i sig selv og ved at være medvirkende til dannelse af fotokemisk luftforurening. Selvom disse stoffer kun udgør en ubetydelig del af det samlede kredsløb, kan de alligevel have stor miljømæssig betydning. De væsentligste kilder er vejtrafik. Også naturlig vegetation udsender flygtige organiske forbindelser, der ofte har en kompliceret struktur med dobbeltbindinger.

## Geografisk fordeling

Hverken de naturlige eller de menneskeskabte kilder (figur 3, side 9) til  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$  er jævnt fordelt på Jorden, men med omsætningsstider på flere år bliver de generelle niveauer af  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$  stort set ens over hele Jorden. Der er dog målelige

forskelle; fx afspejler forskellen i vegetation på den nordlige og den sydlige halvkugle sig i modsatte årstidsvariationer (se figur 9 side 16 nederst). For  $\text{CO}_2$ , der har en levetid på nogle måneder, ses generelt højere niveauer på den nordlige halvkugle, hvor de store landmasser og højere grad af industrialisering giver størst udslip (jf. figur 3 side 9).

## Fjernelse fra atmosfæren

Kulstofforbindelser i atmosfæren kan - som andre stoffer - igen fjernes ved forskellige kemiske og fysiske processer, fx afsætning på overflader. De kan også opblandes i den øvre troposfære og den nedre stratosfære og her reagere med Cl- eller O-atomer. Generelt er den dominerende kemiske proces dog reaktioner med OH-radikaler. Når  $\text{CO}_2$  findes i størst mængde, skyldes det, at  $\text{CO}_2$  i den oxiderende atmosfære, er den mest stabile kemiske form i gasfase. Dermed bliver det slutproduktet ved omdannelsen af de øvrige kulstofforbindelser.

$\text{CO}_2$  forsvinder ikke umiddelbart som sådan, men overføres i første omgang mellem atmosfæren, havet og jorden. Kun over geologiske tidsrum sker en endelig binding af kulstoffet. Problemet er netop, at disse langsomme processer ikke kan følge med de menneskeskabte udslip.

Tabel 1.  
Kulstofforbindelser i atmosfæren. De angivne omsætningsstider er kun tentative. "Kulbrinter" dækker over flere hundrede flygtige kulbrinter - udover metan. (ppmv betyder del per million målt som volumen).

Navn, formel	Koncentration	Omsætningsstid
Kuldioxid, $\text{CO}_2$	360 ppmv	50-200 år
Metan, $\text{CH}_4$	1,7 ppmv	10 år
Kulmonoxid, $\text{CO}$	0,1 ppmv	Måneder
Kulbrinter	25 $\text{mg/m}^3$	Minutter-dage

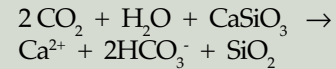
# De naturlige kulstofkredsløb

## Det geokemiske kredsløb

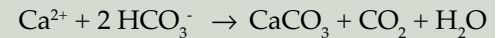
Over geologiske tidsrum på millioner år reguleres transporten af kulstof mellem atmosfæren, jordoverfladen og oceanerne af det såkaldte *geokemiske kredsløb* (figur 7). Kuldioxid er blevet optaget af planter, og noget er bundet i jorden, hvor det reagerer med vand og danner kulsyre, der nedbryder karbonater. Resulterende altså:



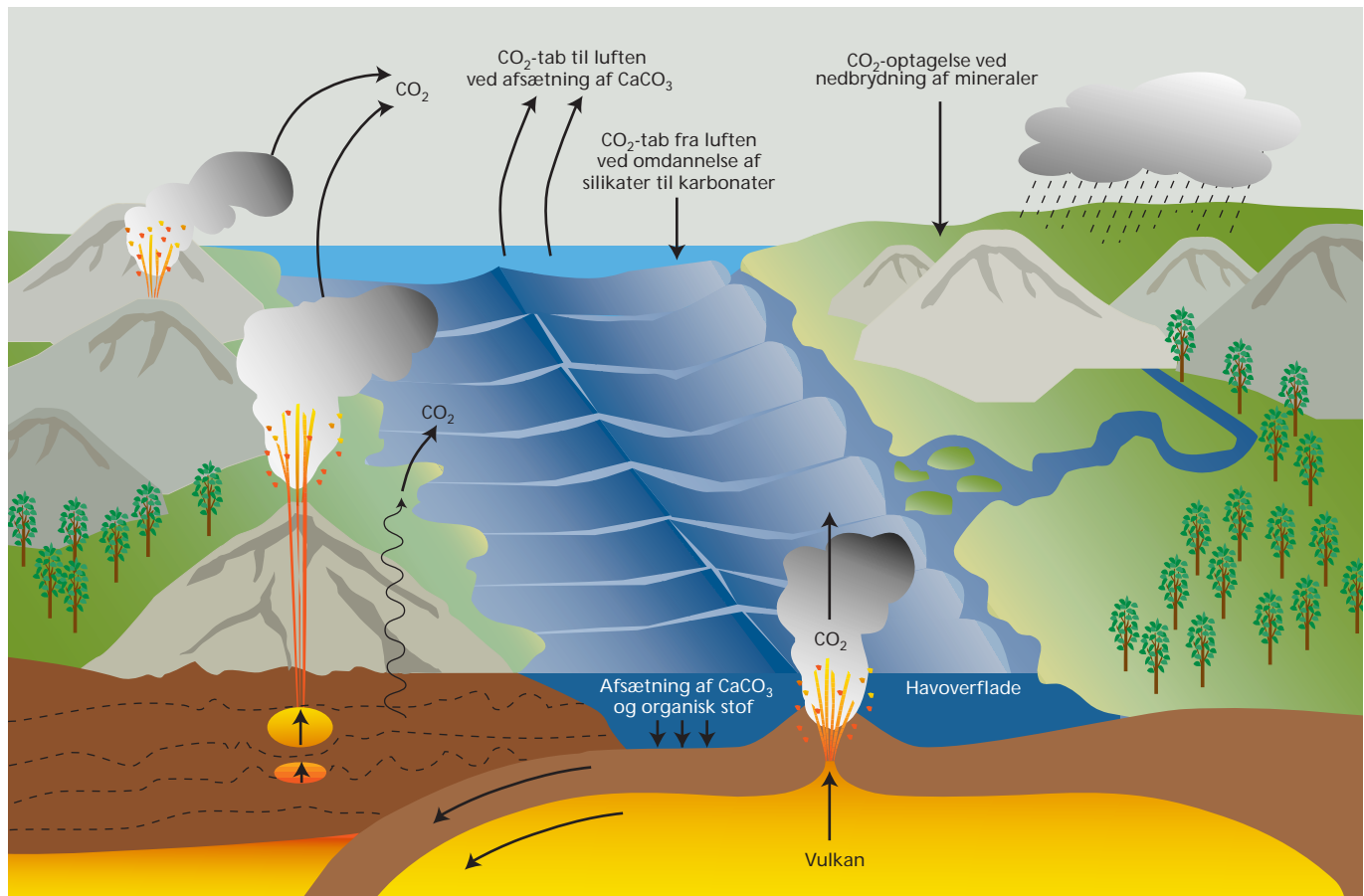
Tilsvarende nedbrydes silikater:



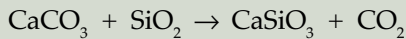
$\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  og  $\text{SiO}_2$  transporteres med floder ud i havet, hvor levende organismer optager  $\text{Ca}^{2+}$  og  $\text{HCO}_3^-$  og igen danner karbonater og frigør  $\text{CO}_2$ :



Figur 7.  
Skematisk fremstilling af det geokemiske kulstofkredsløb.  
(Efter Berner, Lasaga 1989).



Nedbrydningen og gendannelsen af carbonat giver ingen nettotab af  $\text{CO}_2$  fra atmosfæren, idet der dannes og forbruges lige meget. For silikater derimod sker der et tab på 1  $\text{CO}_2$  pr. nedbrudt  $\text{CaSiO}_3$ , idet der forbruges 2  $\text{CO}_2$  og kun umiddelbart gendannes 1  $\text{CO}_2$ . I stedet frigøres 1  $\text{SiO}_2$ . Balancen genoprettes i Jordens dybere lag, hvor pladetektoniske bevægelser presser carbonater ned, hvorefter  $\text{CaCO}_3$  og  $\text{SiO}_2$  reagerer ved høj varme:

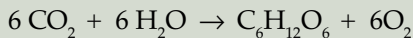


Den dannede  $\text{CO}_2$  udsendes derefter til atmosfæren bl.a. fra vulkaner og sodakilder.

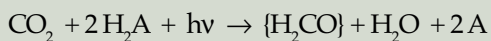
## Det biologiske kredsløb

På tidsskalaer mindre end mange tusind år er det dannelse og nedbrydning af organisk materiale - dvs. fotosyntese, respiration og forbrænding, der i det væsentlige påvirker atmosfærens indhold af  $\text{CO}_2$ . Disse reaktioner får  $\text{CO}_2$  til at variere modsat af  $\text{O}_2$  - både hvad angår generel tendens og årstidsvariationer.

Planter, alger og cyanobakterier er autotrope - dvs. de kan opbygge alle deres organiske stoffer fra uorganiske komponenter via *fotosyntese* og ved hjælp af solenergi:



$\text{CO}_2$ -bindingen kan også i visse tilfælde ske ved reaktion med  $\text{H}_2\text{S}$  (svovlbrinte) eller  $\text{H}_2$ . Generelt kan den skrives:



hvor processen forløber via biologiske organismer og

A står for O, S, evt. et organisk radikal eller ingenting (afhængig af de involverede organismer

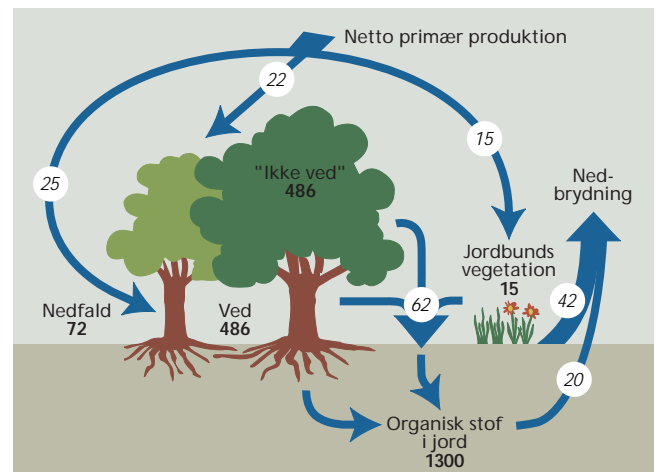
hv er energien af et kvantum lys udtrykt som Planck-konstanten gange frekvensen

$\{\text{H}_2\text{CO}\}$  symboliserer organisk stof

*Respiration* er den omvendte reaktion, hvor kulhydrater nedbrydes til  $\text{CO}_2$  og  $\text{H}_2\text{O}$  under frigivelse af energi. Energien kan oplagres ved dannelse af adenosin triphosphat (ATP), som driver andre kemiske reaktioner, der er nødvendige for planters stofomsætning. Dyr (og herunder mennesker) kan normalt kun få energien indirekte ved at spise planter eller andre dyr. I særlige tilfælde kan der dog optræde såkaldt symbiose mellem dyr og alger.

På grund af disse reaktioner kan der lokalt optræde døgnvariationer i koncentrationen af  $\text{CO}_2$ . Desuden vil den globale koncentration variere med årstiden (figur 9, side 17). På den nordlige halvkugle er den mindst sidst på året, hvor mest kulstof er bundet i vegetation eller uforrådnat plantemateriale. På den sydlige halvkugle er variationen modsat og udsvingene væsentligt mindre, fordi der er mindre landareal. Endelig kan kredsløbet påvirkes af bl.a. El Niño fænomenet, der medfører store svingninger i havets indhold af organisk materiale (se side 17).

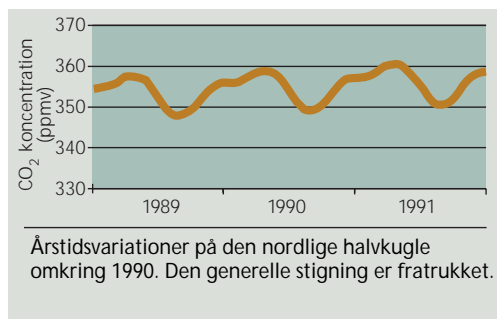
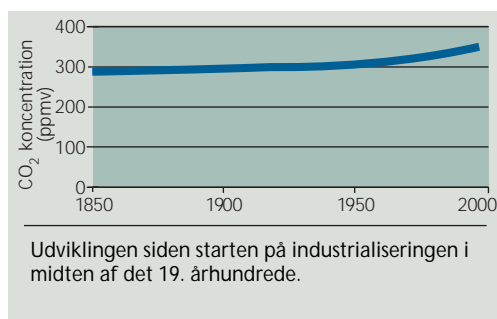
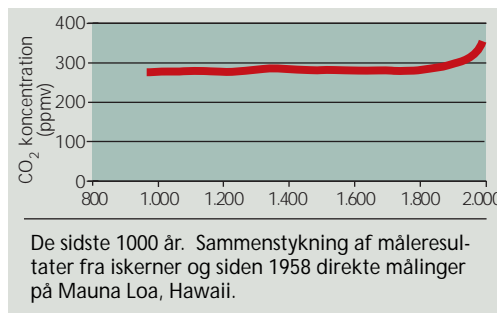
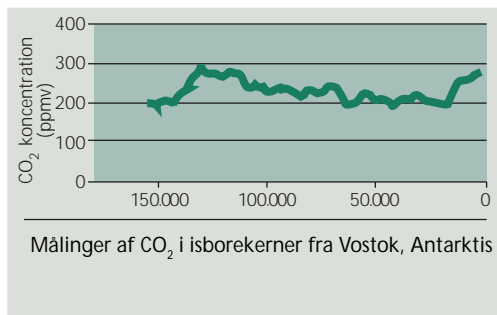
Figur 8 viser det organiske delkredsløb mellem atmosfære, vegetation og jord, hvor organisk stof i jorden spiller en væsentlig rolle.



Figur 8. Jorddelen i det globale kulstofkredsløb. Reservoirmængder i PgC, fluxe i PgC/år. (Pg =  $10^{15}$  g = milliarder ton). (Efter W.M. Post III i Heimann 1993).



# De sidste par hundrede tusinde år



Man har siden midten af det 19. århundrede været klar over, at Jordens varmebalance afhænger af atmosfærens indhold af kuldioxid, men det er først blevet registreret systematisk og direkte efter 1958, hvor man startede målinger ved Mauna Loa Observatoriet på Hawaii.

Imidlertid er det nu muligt at få oplysninger om tidligere værdier ved forskellige indirekte metoder. Man kan fx analysere isotopforhold i mosprøver, træringe mm. Af størst betydning er imidlertid analyser af isborekerner, der direkte indeholder indefrosset atmosfærisk luft. Herved kan med rimelighed få værdier for både CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub>, der går omkring flere hundrede tusinde år tilbage. Figur 9 viser med forskellig tidsskala den samlede udvikling.

Ved det sidste istidsmaksimum for omkring 18.000 år siden var CO<sub>2</sub>-koncentrationen 190-200 ppmv. Derefter steg den og har de seneste 1000 år været omkring 280 ppmv med en stigning på 10 ppmv omkring år 1200-1350. Gennem de sidste par hundrede år har der igen været en stigning i CO<sub>2</sub>-koncentrationen med omkring 30% til 360 ppmv.

Der er ingen tvivl om, at denne sidste, hurtige stigning i væsentlig grad skyldes anvendelse af fossile brændsler. En klar indikation er, at atmosfærens relative indhold af <sup>14</sup>CO<sub>2</sub> er faldet ca. 2% i perioden 1800-1950 som følge af en "fortynding" med <sup>14</sup>C-fattigt materiale. Tilsvarende, men knap så entydigt, er <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C-forholdet faldende (figur 5, side 11).

Figur 9.  
CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren.

## ENSO (El Niño Southern Oscillation)

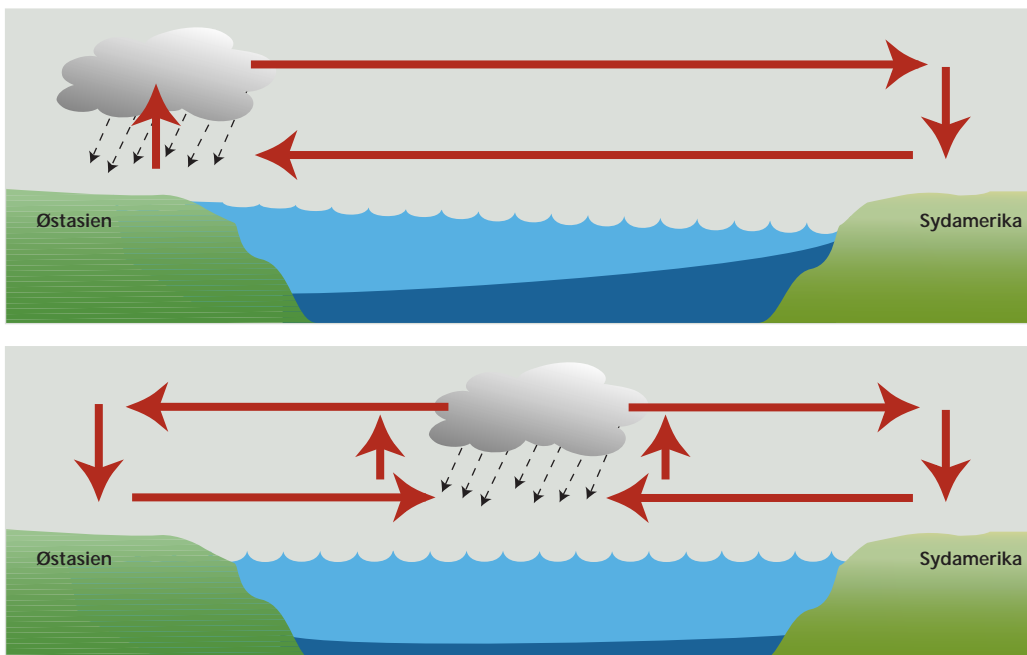
Det biologiske kredsløb påvirkes af ændringer i vækstbetingelse for vegetation. Af særlig betydning er det såkaldte El Niño fænomen (figur 10). Under normale omstændigheder blæser passatvinde omkring Ækvator fra Sydamerika (Peru) mod vest mod Østasien (Indonesien). Vandet presses med og vandstanden bliver ca. 50 cm lavere ud for Peru. Herved vælder det kolde dybhavsvand op mod overfladen ved Sydamerika. Det har to virkninger:

- 1) Det kolde næringsrige vand ved Sydamerikas vestkyst giver et rigt fiskeliv.
- 2) Det varme overfladevand ved Østasiens varmer luften op, den stiger til vejr, køles af og danner skyer med nedbør og blæser mod øst. I øst (Sydamerika) synker luften ned, og der opstår på denne måde et selvforstærkende kredsløb (den såkaldte Walker cirkulation).

Af endnu ikke fuldt forståede grunde svækkes passatvindene med nogle års mellemrum. Det får systemet til at bryde sammen, og det har igen to virkninger:

- 1) Vandtemperaturen stiger ved Sydamerika ofte resulterende i en massiv fiskedød ved juletid. Fænomenet har derfor fået navnet El Niño - (Kristus)barnet.
- 2) Nedbørsområdet ved Asien forskydes ud over Stillehavet, og der opstår tørke over land. I løbet af ca. et halvt år genopretter havstrømme den oprindelige situation.

I "El Niño år" er der også usædvanlige vejrforhold i store dele af den øvrige verden, således ofte med mindre nedbør i Sydøstafrika. På grund af vekselvirkningen mellem de meteorologiske forhold og den biologiske aktivitet har El Niño på kort sigt indflydelse på atmosfærens indhold af kuldioxid, fordi mængden af kulstof, der er bundet i biomasse, midlertidigt reduceres. Samtidig frigøres kuldioxid ved opblanding af kulstofrigt bundvand.



Figur 10. Stærkt forenklet fremstilling af El Niño fænomenet omkring Ækvator i Stillehavet. Øverst er vist den normale situation, med højtliggende koldt dybsøvand ud for Peru (Sydamerika) og nedbør i Indonesien (Østasien). Nederst ses El Niño situationen, hvor det kolde vand ligger dybere ud for Sydamerika, og der er tørke i Østasien.

# Det nuværende globale kulstofkredsløb

Tabel 3 (øverst).

Menneskeskabt påvirkning af det globale kulstofkredsløb via CO<sub>2</sub>. Middel for perioden 1980-89.

Efter (IPCC, 1995).

Tabel 4 (nederst).

Anslåede kilder og dræn for CH<sub>4</sub>. Middel for perioden 1980-89.

Bemærk, at der her er tilstræbt en total stofbalance - i modsætning til i tabel 3, hvor der kun er vist den menneskeskabte påvirkning.

1 gigaton (Gt) = 10<sup>9</sup> ton = 10<sup>3</sup> teragram (Tg).

(Efter IPCC, 1996).

Før den industrielle revolution tog fart i midten af det 19. århundrede var det geokemiske kulstofkredsløb stort set i balance. Den mængde CO<sub>2</sub>, der blev frigjort ved forvitring af mineraler, var af samme størrelse som den mængde, der blev bundet som karbonater, specielt calciumkarbonat (kalksten). Tilsvarende gjaldt det biologiske kulstofkredsløb. Så godt som alt optaget CO<sub>2</sub> blev returneret fra biosfæren til jord, vand og luft. Energien til omsætningen kom (og kommer) fra solstrålingen, som planterne udnytter i forbindelse med fotosyntesen.

## Kuldioxid

Den nuværende menneskeskabte påvirkning af det globale kulstofkredsløb i form af udslip af CO<sub>2</sub> til atmosfæren fremgår af tabel 3. Størst bidrag - samlet knap 80% - skyldes forbrænding af fossile brændsler

og i mindre omfang cementproduktion, resten skyldes nettoændringer i troperne med skovrydninger og efterfølgende landbrug eller kun delvis genplantning (godt 20%).

Det er interessant at bemærke, at al den CO<sub>2</sub> (eller strengt taget det kulstof), der på denne måde sendes ud i atmosfæren, har været der før, dengang atmosfærens indhold var langt højere. De fossile brændsler er dannet af organisk materiale, der igen er blev opbygget af CO<sub>2</sub> fra atmosfæren ved hjælp af fotosyntese. Tilsvarende gælder - om end med en langt kortere tidshorisont - for skovrydninger og anvendelse af forskellige former for biobrændsler. Også fremstilling af cement, der sker ved ophedning af kalkbjergarter, sender CO<sub>2</sub> tilbage til atmosfæren.

Problemet er blot, at det meste af det kulstof, der i forskellig form er blevet oplagret over geologiske tidsrum, nu - i bogstaveligste forstand - bliver brændt af i løbet af få århundreder. Og det kan de naturlige kredsløb, der skal slutdeponere kulstoffet selvfølgelig ikke følge med til.

## "The missing sink"

For tiden ender dog kun lidt under halvdelen af det menneskeskabte CO<sub>2</sub> i atmosfæren, medens en del af resten optages i oceanerne og i skovvækst på den nordlige halvkugle. Tilbage er knap en femtedel, som det ikke umiddelbart var let at gøre rede for. Den blev derfor omtalt som "The missing sink". Der synes imidlertid at være tale om optagelse i biosfæren i tempererede områder - delvis som forøget skovvækst. Det er en lidt utryk situation, fordi man

Kilder til kuldioxid	GtC per år	
Fossile brændsler og produktion af cement	5,5	+/- 0,5
Ændringer i tropiske skove	1,6	+/- 1,0
<b>Dræn</b>		
Atmosfæren	3,3	+/- 0,2
Oceanerne	2,0	+/- 0,8
Skove på den nordlige halvkugle	0,5	+/- 0,5
Anslåede gødningseffekter mv.	1,3	+/- 1,5

Identificerede kilder til metan	Tg CH <sub>4</sub> per år	
Naturlige kilder (vådområder, termitter, oceaner)	160	(110-210)
Energirelaterede antropogene kilder (kulminer, naturgasanlæg)	100	(70-120)
Biogene antropogene kilder (rismarker, drøvtyggere)	275	(200-350)
<b>Dræn</b>		
Optag i atmosfæren	37	(35-40)
Nedbrydning af OH i troposfæren	490	(405-575)
Nedbrydning i stratosfæren	40	(32-48)
Optag i jord	30	(15-45)

ikke kan være sikker på hvor længe en sådan deponering kan fortsætte (se figur 16 side 24).

Det skønnes, at der i alt i perioden op til 1990 er udsendt 340 milliarder tons kulstof til atmosfæren som følge af menneskelige aktiviteter. Omkring halvdelen er der endnu!

## Metan

Den næstvigtigste drivhusgas er metan ( $\text{CH}_4$ ). Den udsendes i store mængder fra såvel naturlige som menneskeskabte kilder og nedbrydes fortrinsvis ved reaktioner med OH-radikaler (tabel 4, nederst), hvorved det omdannes til  $\text{CO}_2$ . Metan virker derfor flere gange.

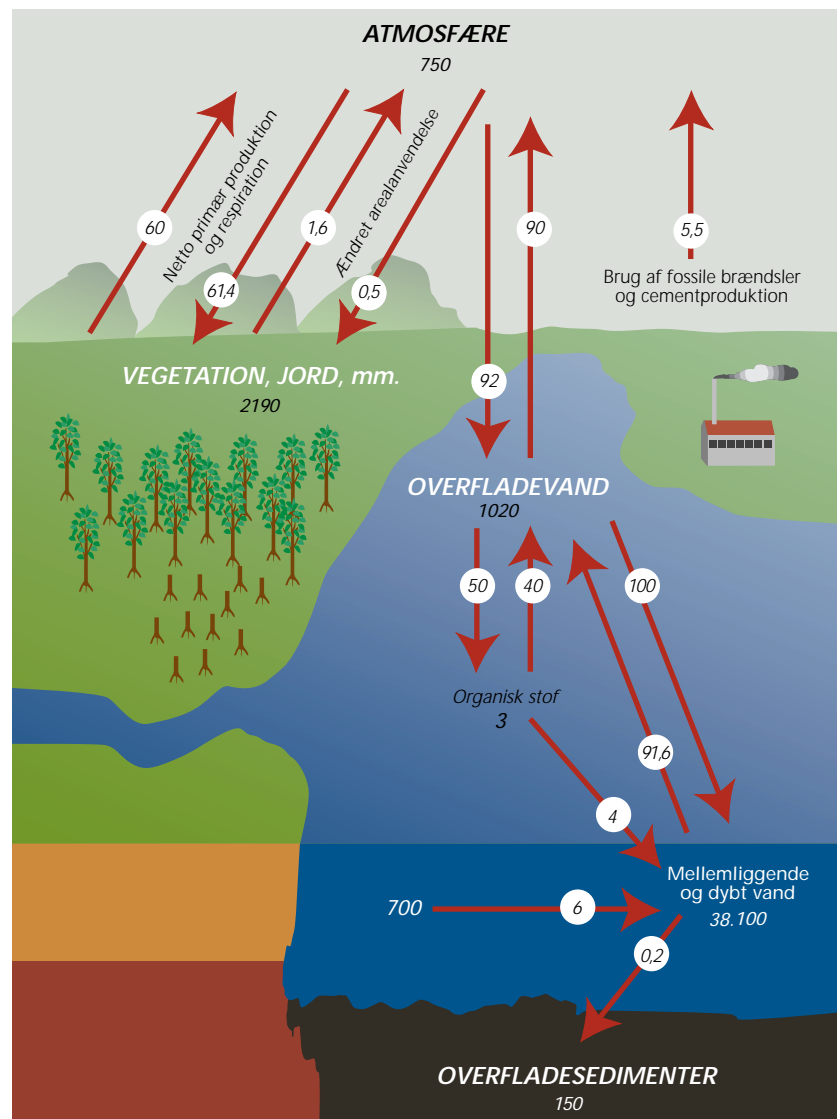
I modsætning til  $\text{CO}_2$  er der for  $\text{CH}_4$  identificeret større dræn (560 Tg/år) end kilder (535 Tg/år). Størstedelen af det menneskeskabte udslip er af biologisk oprindelse. Det betyder, at det er meget vanskeligt at foretage indgreb, fordi de største kilder, der i høj grad er knyttet til fødevareproduktion, er meget spredte.

## Det samlede billede

En samlet vurdering af de forskellige delkredsløb giver skemaet figur 11, der er gengivet i flere rapporter fra IPCC (Det mellemstatslige Klimapanel). Man ser, at bidragene angivet i tabel 3 og 4 betyder, at systemet ikke er i ligevægt, idet der sendes mere ud i atmosfæren, end der afgives fra atmosfæren. Ubalancen skyldes i det væsentlige brugen af fossile brændsler, der dog delvis kompenseres af optag i oceanerne, samt i mindre omfang i et nettooptag i vegetation, jord mm. Det er denne ubalance, der medfører stigningen i atmosfærens indhold af  $\text{CO}_2$  og  $\text{CH}_4$ . Det ses, at der er tale om mindre stofmængder end dem, der "naturligt" cirkulerer i de globale

kredsløb. Alligevel betyder de lange responstider - især for  $\text{CO}_2$  - at der kan opbygges væsentlige koncentrationsændringer og at det vil vare længe, før systemet kommer i balance igen.

Figur 11. Det nuværende globale kulstofkredsløb med anslåede puljer og stofstrømme. Da der kan optræde mange forskellige forbindelser, der omdannes til hinanden, er alt angivet som elementært kulstof. Tallene i cirklerne er transporter i Gigaton kulstof per år. Andre tal er kulstofpuljer målt i Gigaton. Et Gigaton er  $10^9$  tons. (Efter IPCC, 1996)

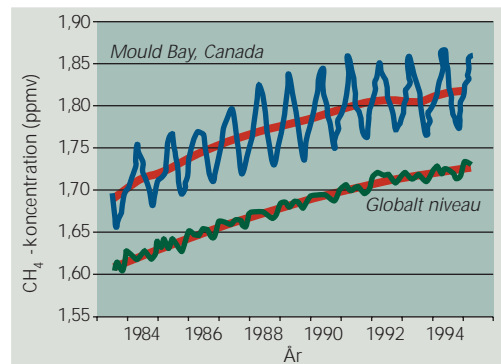




# Den forøgede drivhuseffekt

## Metan

Metan,  $\text{CH}_4$ , er den mest udbredte organiske forbindelse i den naturlige troposfære. Koncentrationen har varieret over



Figur 12. Koncentrationen af metan i atmosfæren siden 1983 (efter IPCC 1996). Selvom mønsteret er det samme, er der ligesom for  $\text{CO}_2$  regionale niveauforskelle.

geologiske tidsrum på samme måde som for  $\text{CO}_2$ , men lå i tiden op til omkring år 1800 på 0,8 ppmv. Derefter er den steget til mere end det dobbelte og var i 1996 omkring 1,7 ppmv. Stigningstakten er dog nu aftagende.

## Lattergas

Koncentrationen af en tredje vigtig drivhusgas, lattergas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) er steget med ca. 14% siden midten af det 19. århundrede bl.a. som følge af anvendelse af kvælstofholdige gødninger.

Når man skal vurdere kuldioxids betydning for fremtidens klima, må man se den

Figur 13. Metan er den næstvigtigste drivhusgas med menneskeskabte kilder. Den dannes bl.a. ved for-gæring uden ilt fx i drøvtyggers fordøjelsessystem.

En anden vigtig kilde er oversvømmede rismarker. Lattergas dannes bl.a. ved anvendelse af kvælstofholdig gødning. Herved bliver både udslip af metan og lattergas snævert knyttet til produktion af fødevarer.



Foto: DMI

i sammenhæng med virkningen af andre drivhusgasser og andre klimapåvirkninger - både naturlige og menneskeskabte.

## Sammenvejning af drivhusgasser

Et givet stof "drivhusvirkning" afhænger af flere faktorer: Dets egenskaber over for stråling med forskellige bølgelængder og dets koncentration og levetid i atmosfæren.

Man kan derfor kun sammenligne og sammenveje de forskellige drivhusgasser med en given tidshorisont. Normalt vælges 100 år. Man beregner derefter et såkaldt "Globalt opvarmnings potentiale" (GWP), der udtrykker hvor effektivt udslippet af en vægtenhed af et givet stof er, sammenlignet med den samme mængde CO<sub>2</sub>. Nogle eksempler på de stoffer, der er omfattet af Kyoto-protokollen (side 34-35) er vist i tabel 2. De fleste stoffer er langt mere effektive end CO<sub>2</sub> og kan derfor have en signifikant virkning, selvom de optræder i meget mindre koncentrationer end CO<sub>2</sub>. Ser man således udelukkende på de tre væsentligste stoffer CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> og N<sub>2</sub>O og ganger deres respektive globale udslip (side 20-21) med deres GWP fås en skønsmæssig relativ betydning på 1 : 0,3 : 0,06.

Udslip af metan og lattergas, der bl.a. er knyttet til produktion af fødevarer (figur 11) giver dermed væsentlige bidrag til den forøgede drivhuseffekt.

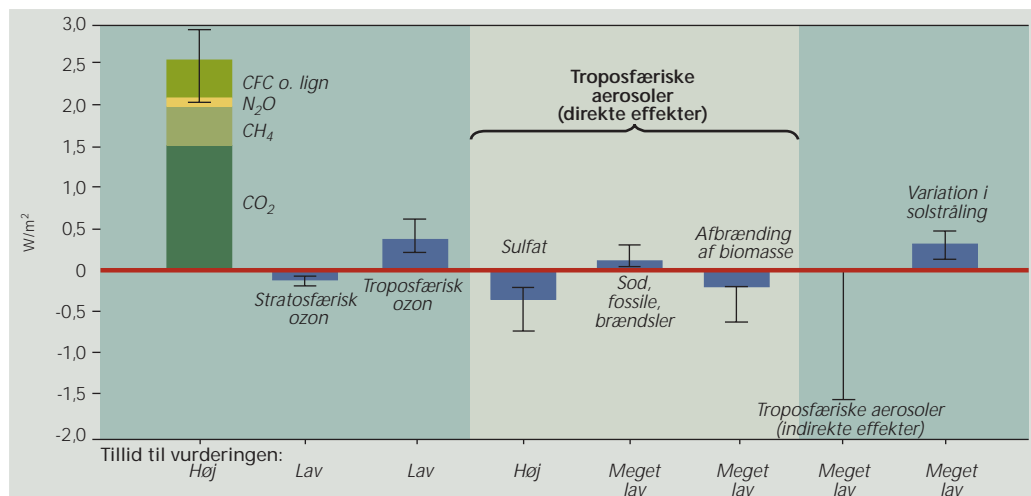
## Samlet strålingspåvirkning

Drivhusgassernes påvirkning af Jordens varmebalance kan udtrykkes i den såkaldte strålingspåvirkning, der er den ændring i netto indstråling de giver anledning til. Der er imidlertid mere i det end som så, for også nedbrydning af ozonlaget, opbygning af fotokemisk dannet ozon i lav højde, samt udsendelse af forskellige partikler spiller en rolle. Figur 14 viser den samlede ændring i strålingspåvirkning inklusive naturlige variationer i solstrålingen som årligt middel i forhold til situationen i 1850.

Navn,	Formel	GWP
Kuldioxid	CO <sub>2</sub>	1
Metan	CH <sub>4</sub>	21
Lattergas	N <sub>2</sub> O	310
CFC'er		4.000-12.000
HFC'er		140-11.700
Svovlhexafluorid,	SF <sub>6</sub>	23.900

Tabel 2.

Eksempler på GWP for 100 år beregnet relativt til CO<sub>2</sub>. For drivhusgasser, der også er ozonlagsnedbrydende (CFC'er, HFC'er og lignende) er situationen kompliceret, fordi en nedbrydning af ozonlaget svækker drivhuseffekten. (Efter IPCC, 1996).



Figur 14.

De forskellige bidrag til ændringen i strålingspåvirkningen siden 1850. Virkningen af partikler (troposfæriske aerosoler), specielt de indirekte effekter, der skyldes skydannelse, er meget usikre, og ophæver måske til en vis grad hinanden. Ser vi bort fra dem, finder vi at CO<sub>2</sub> tegner sig for knap 2/3 af den forøgede drivhuseffekt.

# Danmarks bidrag

Danmark udgør befolkningsmæssigt kun ca. 1/1000 af hele verden og arealmæssigt kun 1/3000. Vores høje materielle levestandard med tilhørende store energiforbrug betyder at udslippet af drivhusgasser er omkring dobbelt så stort som verdensgennemsnittet regnet per indbygger (figur 25 side 30). Det er selvfølgelig ikke dette udslip der bestemmer den globale udvikling, men lad os benytte Danmark til at illustrere nogle karakteristiske forhold.

## Udviklingen i gennem hele 1900-tallet

Det danske indenlandske bruttoenergiforbrug siden år 1900 er vist i figur 15. Man ser en jævn stigning i forbruget op til oliekriserne i 1970'erne kun svagt afdæmpet under de to verdenskrige. På grund af det

ringe brændsel var udslippet af CO<sub>2</sub> per produceret energienhed imidlertid højt under krigen.

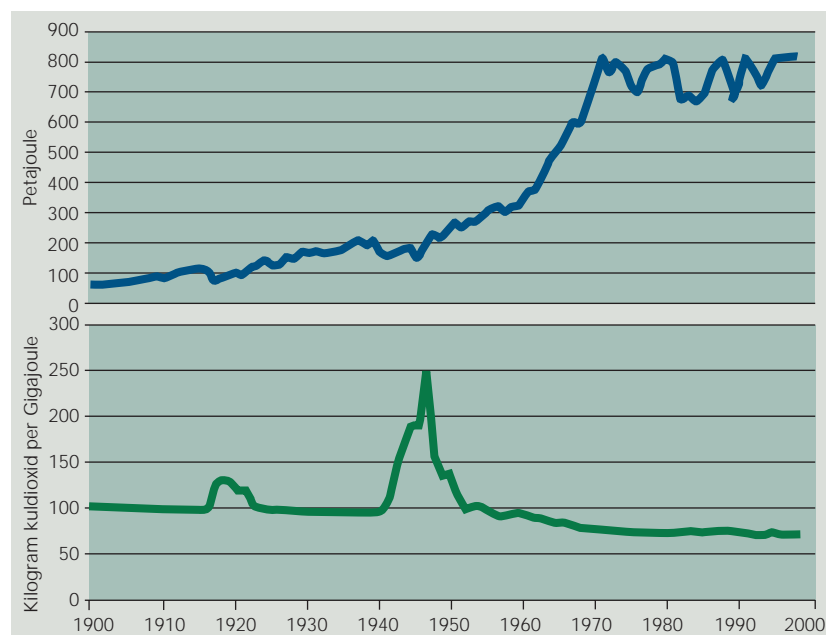
Efter 1970 har det samlede energiforbrug kun vist mindre variationer.

## Det sidste tiår

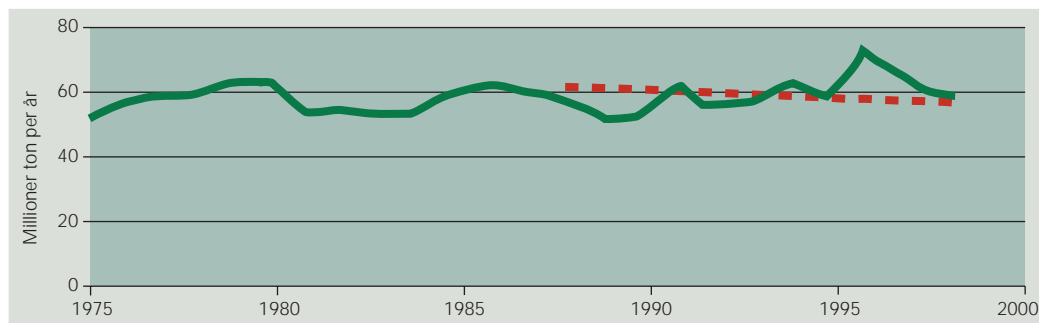
De senere års nationale og internationale reguleringer af luftforurening har medført et behov for detaljerede opgørelser af udslip - bl.a. til kontrol af, om de besluttede målsætninger opfyldes. Man vil af politiske grunde gerne kunne følge udviklingen fra år til år, men i praksis vil statistiske variationer i energiforbruget helt sløre ændringer over en så kort periode. Figur 15 viser således, at det danske udslip af CO<sub>2</sub> fra energisektoren i perioden 1988-98 ikke har nogen klar tendens eller måske endda en svag stigning.

Man korrigerer derfor i første omgang for temperaturvariationer (graddage). Af langt større betydning er imidlertid den stigende internationale handel med elektricitet, hvor Danmark snart sælger til, snart køber fra nabolandene - især Sverige og Norge. Korrigerer man også for dette, får man den stiplede kurve på figur 16, der viser et jævnt svagt fald på ca. 1/2 % om året. Det viser på sin vis rimeligt nok udviklingen i det nationale forbrug, men er alligevel ikke helt ukontroversielt. Drivhuseffekten er jo ligeglad med, hvor udslippene sker, og det må erkendes at elektriciteten er *solgt eller købt* og dermed giver mulighed for handel med varer, som det har krævet energi at fremstille. Skulle man være konsekvent burde man modregne det tilsvarende CO<sub>2</sub>-udslip, men det ville være uoverkommeligt i praksis.

Figur 15.  
Danmarks bruttoenergiforbrug siden år 1900. Nedenunder er vist CO<sub>2</sub>-udslippet per produceret energienhed. Energiforbrug til udenrigstrafik - af størrelsesorden 10% - er ikke medregnet. 1 petajoule = 10<sup>6</sup> gigajoule (jf. tabel 6 side 26).







**Figur 16.** Danmarks udslip af CO<sub>2</sub> fra energisektoren i perioden 1975-1998. Den fuldt optrukne, grønne kurve viser det faktiske udslip. Den stiplede, røde kurve er korrigeret for klimaeffekter og el-handel.

Hertil kommer, at når man køber elektricitet, regnes det som udslip af CO<sub>2</sub>, selvom elektriciteten ofte er produceret med vand- eller kernekraft - dvs. uden CO<sub>2</sub>-udslip.

Et andet problem opstår når man, i forbindelse med internationalt aftalte reduktioner af udslip, skal referere til et konkret årstal (side 34). Her kommer Danmark i klemme, fordi vi i basisåret 1990 netop havde en stor el-import og dermed et relativt lavt CO<sub>2</sub>-udslip. I 1988 som er basisåret for en national målsætning (20% reduktion i 2005) var CO<sub>2</sub>-udslippet ca. 10% højere!

Danmarks menneskeskabte CO <sub>2</sub> -udslip	%
Kraftværker og raffinaderier	55,7
Beboelse og institutioner	10,7
Industri	9,0
Vejtransport	17,1
Andre mobile kilder	5,7
Natur og skovbrug	-1,6
Landbrug	3,3

**Tabel 5.** Danmarks faktiske menneskeskabte CO<sub>2</sub>-udslip var i 1997 62 millioner tons. Her er vist fordelingen i % på sektorer. Bemærk at bidraget fra natur og skovbrug er negativt. Det er fordi der sker et nettooptag i skovbrug (se iøvrigt side 28).

### Fordeling på sektorer

Ser vi mere detaljeret på, hvor den danske CO<sub>2</sub> kommer fra, fås fordelingen vist i tabel 5. Det absolut dominerende bidrag (over halvdelen) giver energiproduktionen. Mobile kilder, specielt vejtrafik, er ansvarlige for næsten en fjerdedel. Det totale faktiske udslip har - inden for de årlige variationer ligget stort set konstant i mere end 20 år, men trafikens bidrag er steget til næsten det dobbelte.

Billedet bliver selvfølgelig lidt anderledes, når man indregner virkningen af andre drivhusgasser (side 20-21), men såvel i Danmark som i mange andre lande er det den voksende trafik, der giver de største vanskeligheder, når man skal opfylde nationale og internationale målsætninger.

**Figur 17.** Den voksende trafik giver Danmark problemer med at opfylde målsætningen om et faldende udslip af CO<sub>2</sub>.



Foto: 2. mgj/Søjla Bkør

# Scenarier for fremtiden

Hvis man ved hvordan de globale stofkredsløb virker, kan man i princippet beregne sammenhængen mellem fremtidige udslip af drivhusgasser og deres koncentration i atmosfæren. Det skaber et grundlag for beregninger af mulige fremtidige klimaændringer. Mest interessant er naturligvis CO<sub>2</sub>.

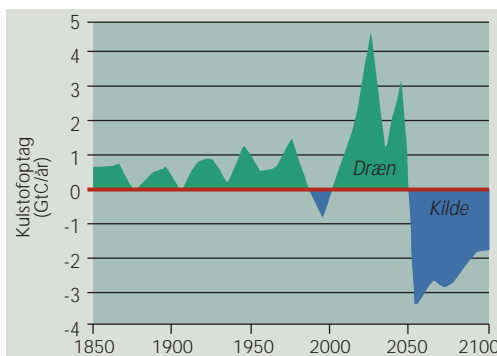
## Komplikationer

I praksis er der imidlertid en række forhold, som det er vanskeligt at forudsæ. Fx er nedbrydningen af jordbundens organiske stof af afgørende betydning for det globale kulstofkredsløb, fordi de organiske stoffer i jordbunden udgør en stor kulstofpulje (se figur 11 side 19). Således er der bundet mere end dobbelt så meget kulstof i jordbunden, som der findes i atmosfæren. Derfor kan selv mindre ændringer i reaktionshastigheder påvirke atmosfærens CO<sub>2</sub>-indhold markant. Ændret arealudnyttelse - fx afvanding/vanding af tørvemoser og engarealer, fældning/plantning af skov og omlægning mellem konventionelt og økologisk landbrug - vil derfor påvirke størrelsen af jordbundens kulstofpulje.

Figur 18.

Fremskrevne ændringer i oplagringen af kulstof på land. Indtil omkring år 2050 er der samlet tale om dræn, derefter skifter billedet og kulstoffet frigøres igen.

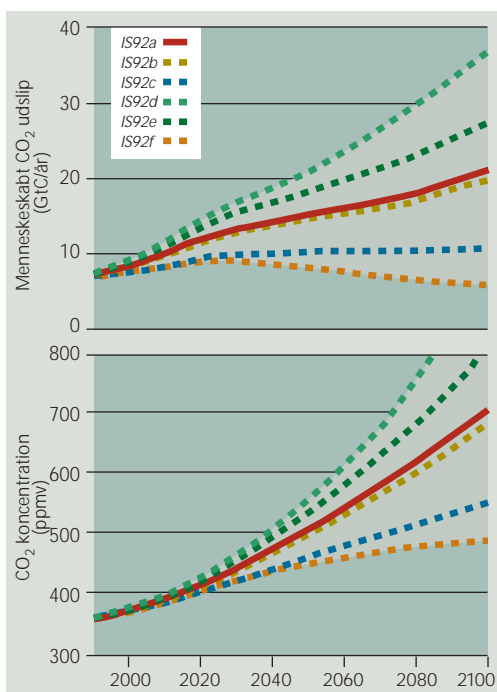
(Efter: The Met. Office 1998)



Figur 19.

Øverst ses viften af IPCC's referencescenarier (IPCC, 1998 og referencer heri). I scenariet med de mindste udslip forudsættes bl.a. en verdensbefolkning i år 2100 på 6,4 milliarder, en gennemsnitlig årlig økonomisk vækst på 1,2% og en reduktion af omkostningerne ved kernekraft. I scenariet med de højeste udslip forudsættes en verdensbefolkning på 11,3 milliarder, en økonomisk vækst på 3% og en udfasning af kernekraft.

Nederst er vist de tilsvarende beregnede CO<sub>2</sub>-koncentrationer. Bemærk at kun i det helt lave - ret urealistiske - scenario er der antydning af en stabilisering.



Man må også forudsæ en tilbagekobling fra stigningen i CO<sub>2</sub>-niveau og klimaændringer til udslip. Fx kan en stigning i CO<sub>2</sub>-niveauet i første omgang virke gødende og derved give en øget skovvækst, der sinker en stigning. Som nævnt side 18 synes det at være tilfældet for tiden. Senere kan klimaændringer imidlertid give en skovdød, der slipper den oplagrede CO<sub>2</sub> fri igen (figur 18).

Man kan opstille to typer af såkaldte scenarier (scenebilleder) for fremtidige CO<sub>2</sub>-niveauer: *Referencescenarier* og *stabiliserings-scenarier*.

## Referencescenarier

Ved opstilling af reference- eller udslipsscenarioer gør man en række antagelser om de fremtidige udslip, der igen baseres på antagelser om den økonomiske og tekno-

logiske udvikling og udviklingen i verdensbefolkningen. Det kan gøres på mange, mere eller mindre sandsynlige og overbevisende, måder. Derfor vælger man normalt en vifte af muligheder, hvoraf - i følge sagens natur - højest en enkelt vil blive realiseret. Sådanne fremtidsscenarier opstilles normalt ikke for mere end 100 år frem i tiden. Og selv det er - usikkerheden taget i betragtning - *meget lang tid* (figur 19).

## Stabiliserings-scenarier

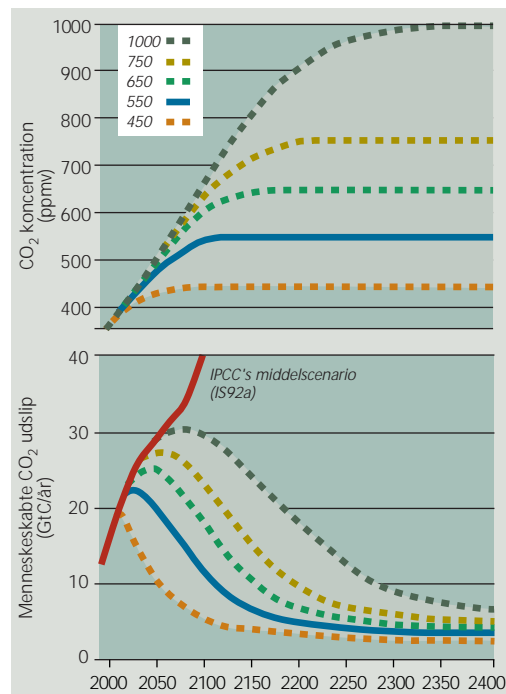
Man kan imidlertid også regne baglæns og starte med at foreskrive forløb, der fører til en stabilisering af CO<sub>2</sub>-koncentrationen på forskellige niveauer. Derefter bestemmer man hvilke globale udslip, der vil give anledning til sådanne forløb - eller sagt på en anden måde: ***Hvis man vil acceptere en given stigning i atmosfærens indhold af CO<sub>2</sub>, hvor stort et globalt udslip kan man så tillade sig i fremtiden?***

Sådanne fremskrivninger er kun rent orienterende, og det skal understreges, at de foreskrevne stabiliseringsniveauer kan nås ad flere veje. Der er heller ikke nogen angivelse af, hvordan de nødvendige forløb i udslip skal realiseres, hverken politisk og teknologisk - *der er tale om rene regne-eksempler*. Endelig er CO<sub>2</sub> som bekendt nok den vigtigste, men ikke den eneste drivhusgas.

Men øvelsen er væsentlig, fordi den demonstrerer problemernes størrelsesorden og systemets inert. Man kan fx, som vist figur 20, vælge at stabilisere CO<sub>2</sub>-niveauet i år 2100 på det dobbelte af hvad det var før industrialiseringen i det 19. århundrede (550 ppm). Det kan i følge modelberegninger give nogle globale klimaændringer (et par °C varmere), som næppe vil være uden problemer, men dog til at leve med. Altså måske et acceptabelt politisk mål (se side 33).

Kravet viser sig imidlertid at være, at det globale udslip i år 2100 efter en uundgåelig stigning skal være tilbage til det nuværende niveau og derefter i de kommende århundreder antagelig skal nedbringes til omkring en femtedel. Det skal ske samtidigt med at Verdens befolkning fortsat stiger. Antagelig skal det gennemsnitlige udslip *per person* reduceres til 1/10 - og samtidigt med at den materielle levestandard i udviklingslandene skal markant forbedres !

Da drivhusgasserne har så lang levetid i atmosfæren, at de kan nå at blive blandet fuldstændigt op, er det for selve effektens skyld helt uden betydning, hvor udslipene sker. *Det eneste der tæller er det samlede globale udslip*. Politisk og økonomisk er det imidlertid et afgørende og kontroversielt spørgsmål, hvordan dette udslip skal fordeles mellem de enkelte lande. Det vender vi tilbage til på side 30-35.



Figur 20.

Viften af IPCC's stabiliserings-scenarier. De lodrette akser er stort set de samme som i figur 19, men tidshorisonten er meget længere. Bemærk at det fremhævede forløb ligger helt i bunden af referencescenarierne i figur 19. Det er her forudsat at atmosfærens CO<sub>2</sub>-koncentration stabiliseres på 550 ppmv efter et givet tidsmønster (øverst), hvorefter det er beregnet hvilke globale udslip det svarer til (nederst). Man kunne have antaget andre forløb med samme slutresultat. Antager man fx at der til at begynde med ikke sker drastiske indgreb, vil det skulle betales med hurtigere reduktioner senere.

Foruden stabiliserings-scenarierne er vist middelforløbet fra figur 19. Det giver overhovedet ikke nogen stabilisering inden for en overskuelig fremtid. På grund af komplicerede kredsløb er det det samlede udslip over tid, der har størst betydning. Det har af nogle (bl.a. den engelske klimaforsker Wigley) været foreslået at det kunne være en fordelagtig strategi at udskyde indgreb til en mere avanceret teknologi var udviklet.

# Begrænsning af udslip



Foto: DMU/Grafik Værksted

**Figur 21.** Energisparepærer giver samme lysstyrke som normale pærer med 5 gange så stort forbrug. De er væsentligt dyrere, men har en længere levetid. De er dog bedst egnede til anvendelser, hvor de kan brænde konstant.

**Tabel 6.** Emissionsfaktorer (udslip per energienhed) for CO<sub>2</sub> fra en række væsentlige fossile brændsler. Enhed: kg/GJ. (Jf. figur 15, side 22)

Brændsel	Typisk anvendelse	Emissionsfaktor
Kul	Større stationære anlæg herunder kraftværker	95
Tung olie	Større stationære anlæg og skibsfart	78
Dieselolie	Vejtransport	74
LPG	Vejtransport og opvarmning	65
Naturgas	Alle stationære anlæg	57

Hvis stabiliseringsscenerier som vist i figur 20 skal realiseres, kræver det en drastisk begrænsning af det effektive globale udslip af CO<sub>2</sub>. Umiddelbart kan det ske ved et lavere energiforbrug eller ved fremstilling af energien på en måde, der medfører et lavere udslip per produceret enhed.

## Besparelser på forbrugssiden

Det er teknisk set muligt at spare på energien og dermed reducere udslip af CO<sub>2</sub> uden at reducere den materielle levestandard: Mere effektive biler, bedre isolerede bygninger, husholdningsredskaber med lavere elforbrug (figur 21) osv. I mange tilfælde vil besparelserne endda være økonomisk fordelagtige. I praksis har den teknologiske udvikling imidlertid i mange tilfælde været omsat i øget forbrug, som fx i form af større og hurtigere biler.

## Reduktioner i produktionsleddet

På produktionssiden omfatter mulighederne for besparelser, der alle realiseres i Danmark, mere effektive anlæg, mindre transmissionstab og effektiv udnyttelse af kombineret kraftvarme produktion.

Når det i Danmark er lykkedes at nedsætte det korrigerede CO<sub>2</sub>-udslip (figur 16 side 23) skyldes det desuden bl.a. såkaldt "Fuel switch". De fossile brændsler består i det

væsentlige af kulstof og brint, der ved forbrænding bliver til henholdsvis kuldioxid (CO<sub>2</sub>) og vand (H<sub>2</sub>O). Det er denne forbrænding, der frigør energi. Jo mere brint et brændsel indeholder, jo mindre udslip af CO<sub>2</sub> giver det derfor per produceret energienhed. Kul indeholder meget lidt brint, olien består af forskellige kulbrinter med en typisk sammensætning af C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>, og naturgas består fortrinsvis af metan CH<sub>4</sub>. LPG (liquid pressurised gas) indeholder både metan og andre flygtige kulbrinter. Det afspejler sig klart i brændslernes respektive emissionsfaktorer (tabel 6). En reduktion i udslip af CO<sub>2</sub> ved fortsat anvendelse af fossile brændsler og samme energiproduktion kan derfor opnås ved forøget brug af lette brændsler. Overgang fra kul til naturgas giver således en reduktion på 40%.

Endnu mindre udslip kan opnås ved at anvende dyrkede biobrændsler, der eventuelt bliver industrielt produceret som fx alkohol til biler. Det hævdes undertiden at de er "CO<sub>2</sub>-neutrale", fordi den udsendte CO<sub>2</sub> kort forinden er blevet fjernet fra atmosfæren ved fotosyntese. Det er dog ikke helt korrekt. Der sker altid et vist energitab ved dyrkning, høst, transport og distribution. Og næsten altid dækkes det med fossile brændsler.

## Vedvarende energikilder

Blandt andre etablerede vedvarende energikilder kan nævnes solfangere, fotoceller og ikke mindst vindmøller (figur 22). I Danmark dækkes nu i alt omkring en tiendedel af energiforbruget med andre kilder end fossile brændsler.





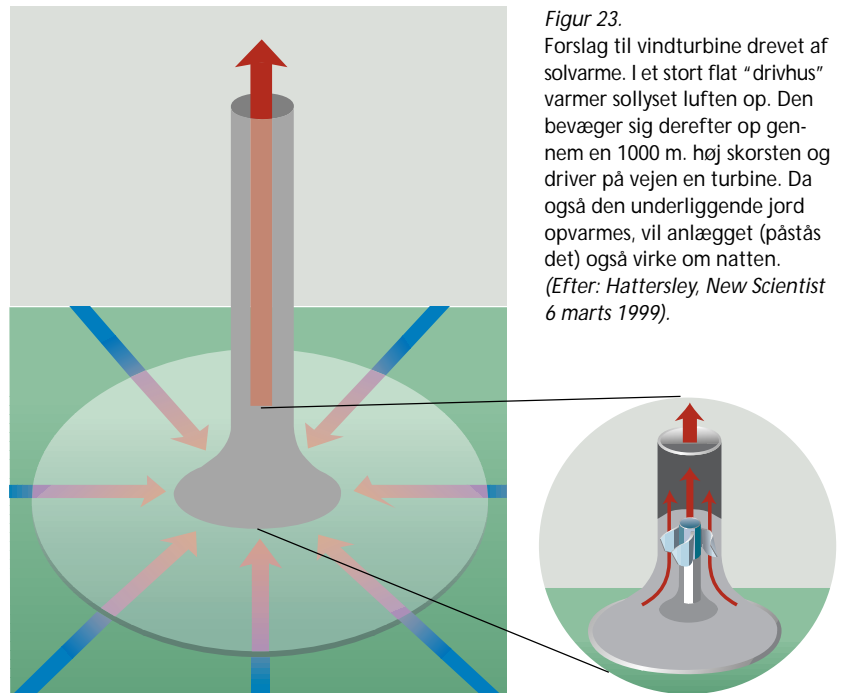
Foto: Flemming Høgenem.

**Figur 22.**  
Rejsby Hede vindmøllepark med en årsproduktion på ca. 57.000 MWh. Ved elproduktion med kulfyring ville dette have medført udsendelse af ca. 45.000 tons CO<sub>2</sub> om året. Produktionsmæssigt svarer parkens 40 møller til omkring 1/25 af Stignæsværket, der er vist på omslaget.

Selvom der både i Danmark og i den øvrige verden forventes en stigning i anvendelsen af kendt teknologi vil det næppe være nok til at bringe CO<sub>2</sub>-udslippet under kontrol i den nærmeste fremtid.

Tidshorizonten er imidlertid 100 år, og det er *meget* lang tid, når det gælder teknologisk udvikling. Prøv engang at sammenligne de tegnede illustrationer i Jules Vernes "Rejsen til Månen", der er skrevet i 1865, med fjernsynsudsendelsen om Armstrong, der faktisk gik på Månen i 1969!

Der vil derfor antagelig i fremtiden komme langt mere avancerede løsninger på markedet. Blandt de mere fantasifulde har været foreslået at man skulle opsende satellitter med store spejle, som reflekterede solenergi ned til modtagerstationer i Sahara. En anden mere realistisk mulighed, der har været prøvet i mindre målestok er vist i figur 23.



**Figur 23.**  
Forslag til vindturbiner drevet af solvarme. I et stort flat "drivhus" varmer sollyset luften op. Den bevæger sig derefter op gennem en 1000 m. høj skorsten og driver på vejen en turbin. Da også den underliggende jord opvarmes, vil anlægget (påstås det) også virke om natten. (Efter: Hattersley, *New Scientist* 6 marts 1999).

# Oplagring og anvendelse



Foto: Lars Vesterdal

Figur 24.  
Vestskoven nær København blev plantet for ca. 30 år siden. Nu skal undersøgelser vise, hvor hurtigt CO<sub>2</sub> oplagres.

Selvom der er mange muligheder for produktion af energi med et lille - eller stort set intet - udslip af CO<sub>2</sub>, må det anses for urealistisk at antage, at man i løbet af de næste årtier vil dække verdens voksende energibehov med reduceret brug af fossile brændsler. Derfor arbejdes der også med forskellige muligheder for at kompensere for den uundgåelige dannelse af CO<sub>2</sub>.

Man har derfor overvejet at udnytte frafrenset CO<sub>2</sub> på samme måde som man fx anvender restprodukter fra afsvovlingsanlæg til fremstilling af gipsonitplader til bygningsindustrien. Der synes at være visse muligheder i store integrerede industri-anlæg, men de enorme mængder CO<sub>2</sub>, der er tale om betyder, at der ikke vil blive tale om noget større bidrag til problemets løsning.

## Skovrejsning

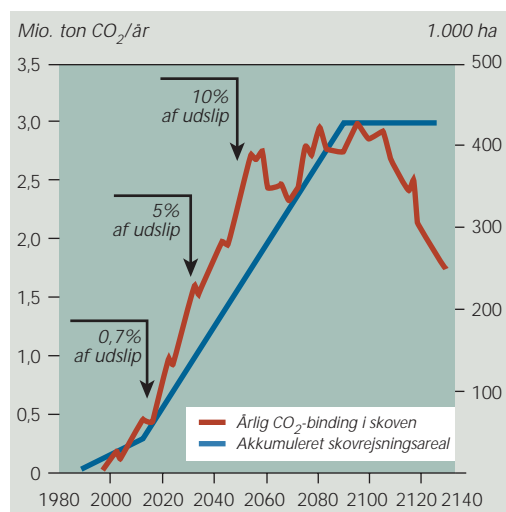
Mere lovende er forøget skovvækst, der er blevet en anerkendt del de enkelte landes drivhusgasregnskab (side 33). I denne forbindelse spiller de tropiske regnskove en væsentlig rolle. I øjeblikket bliver de fjernet med en hastighed på knap 1% om året, svarende til et udslip på 1,6 Gt kulstof eller godt en fjerdedel af det samlede menneskeskabte udslip (tabel 3 side 18). Denne tendens bør af mange grunde stoppes og om muligt vendes. Allerede nu skønnes det, at der verden over er 4 millioner ha skov, der forvaltes som kulstoflager. I flere tilfælde er der tale om projekter i udviklingslande bl.a. Costa Rica.

## Anvendelse af CO<sub>2</sub>

Kuldioxid anvendes til en række industrielle formål fx i mineralvand, i ildslukkere og i forbindelse med indpakning af føde-midler. I den kemiske industri anvendes CO<sub>2</sub> til produktion af urinstof. I gartnerier tilsættes CO<sub>2</sub> undertiden til luften i drivhuse for at forøge fotosyntesen og dermed øge udbyttet.

I Danmark har Forskningscentret for Skov & Landskab og Den Kgl. Veterinær- og Landbohøjskole gjort forsøg i Vestskoven for at vise hvor hurtigt et CO<sub>2</sub>-lager opbygges (figur 24).

Det er i anden sammenhæng besluttet at fordoble Danmarks skovareal i løbet af de næste ca. 100 år fra de nuværende godt 400.000 ha eller ca. 10% af Danmarks areal. Kulstofbindingen viser sig at afhænge af mange forhold: Træart, jordbund osv., men det skønnes der samlet vil kunne bindes 300 millioner tons CO<sub>2</sub> over en 100 årig



Figur 25.  
Skovrejsning i Danmark skønnes at kunne binde ca. 300 millioner tons CO<sub>2</sub> alene i ved-massen over de næste 100 år. Hertil kommer oplagring i jorden.

periode. Derefter vil virkningen aftage, fordi skovene er fuldt udvoksede (figur 23). Sammenlignet med Danmarks nuværende årlige udslip på ca. 60 millioner tons er der altså kun tale om af størrelsesordenen gennemsnitligt 5%. Altså et lille skridt i den rigtige retning, men ikke nogen selvstændig løsning.

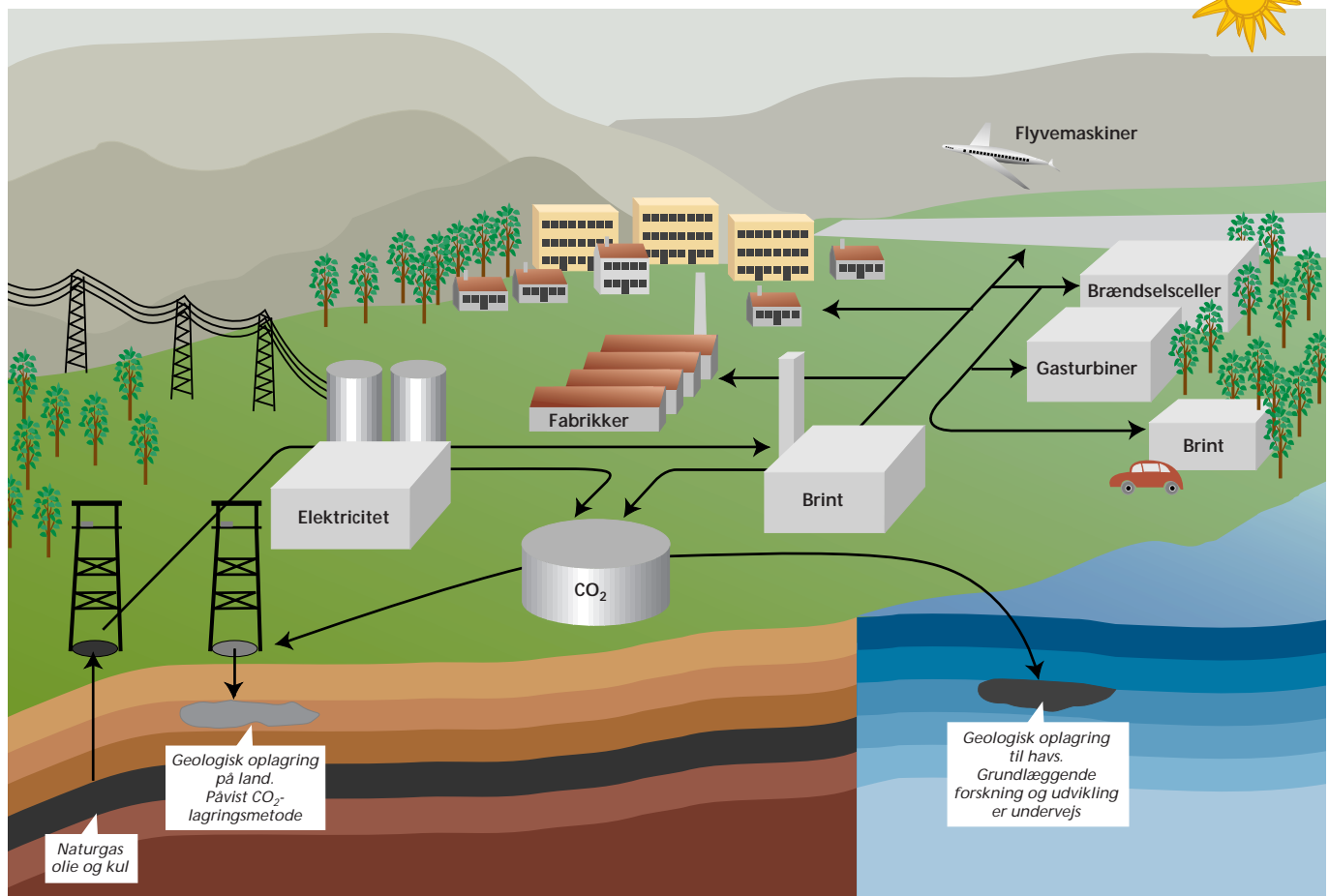
## Oplagring

Som vist i figur 4 (side 10) er CO<sub>2</sub> flydende ved passende højt tryk og lav temperatur. Det er derfor muligt, efter udskillelse fra røggassen, at oplagre det i kondenseret form i geologiske reservoirer eller på havbund. Umiddelbart egner disse metoder

sig kun for store stationære anlæg som kraftværker, men ved en kombination med fremstilling af brint som brændstof til bl.a. biler kan stort set alle sektorer i princippet dækkes (figur 26).

I princippet vil det være en løsning med langt større kapacitet end skovrejsning, men det er en dyr løsning med samlede produktionsomkostninger, der vil være flere gange højere end ved konventionel anvendelse af fossile brændsler. Det er også et uafklaret spørgsmål, om den deponerede CO<sub>2</sub> vil blive tilstrækkeligt længe på stedet. Det vil være en kritisk forudsætning, hvis deponering skal kunne indgå i de internationale udslipsregnskaber (side 33).

*Figur 26.*  
Det norske firma Statoil's teknologiske fremtidsvision, hvor fossile brændsler enten anvendes direkte i kraftværker eller udnyttes til fremstilling af brint som brændstof til mindre anlæg. CO<sub>2</sub> skilles fra og oplagres under tryk. Man kan endda forestille sig at CO<sub>2</sub> benyttes til at presse olie eller gas op fra undergrunden.





# I-lande, U-lande og overgangsøkonomier

I hele dette spil er verdens enkelte lande vidt forskelligt stillet. Et givet lands CO<sub>2</sub>-udslip afhænger af den generelle levestandard, graden af industrialisering, behovet for opvarmning og transport mm. Hertil kommer landets muligheder for at fremstille energi med metoder, der giver et lille eller intet CO<sub>2</sub>-udslip: Vandkraft, vindkraft, solenergi, jordvarme osv. Forskellige landes og områders udslip per indbygger er vist i figur 27.

Danmark har af mange grunde et relativt stort udslip per indbygger. Det er væsentligt større end udslippet i Norge, hvor man har vandkraft og i Sverige, hvor man også har A-kraft. Vi har dog et stort potentiale for besparelser i form af effektivisering i produktions- og forbrugsleddet.

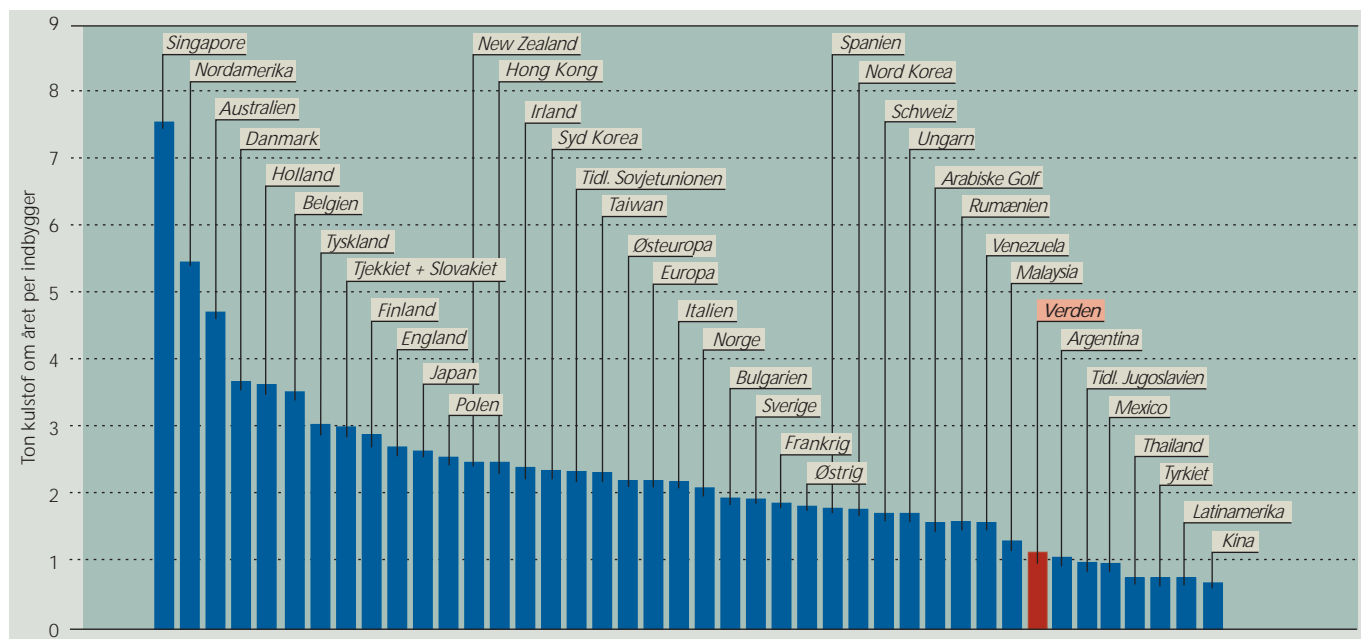
Mellem I-lande og U-lande står landene med overgangsøkonomier dvs. i det væsentlige østlande på vej fra planøkonomi til markedsøkonomi. Til trods for en forældet teknologi har de i dag et relativt lavt udslip, fordi Sovjetunionens sammenbrud omkring 1990 betød en kraftig, men formentlig midlertidig, økonomisk tilbagegang.

Alle disse forhold spiller en rolle, når der internationalt forhandles fordeling af udslip (side 32-35).

## I-lande og U-lande

Det basale problem er imidlertid forholdet mellem I- og U-lande. Det kan stilles op på mange - mere eller mindre manipulerende - måder, men der er ingen tvivl

Figur 27.  
Udslip af CO<sub>2</sub>, i 1995 regnet som kulstof, per indbygger i en række områder og enkeltlande. (Kilde: Exxon).



om, at indtil nu har I-landene haft hovedansvaret for udslippene. Typisk giver en indbygger i et I-land anledning til udsendelse af fire gange så meget CO<sub>2</sub> som en indbygger i et U-land (figur 27).

Det har fået nogen til at hævde, at I-landene allerede nu skyldte U-landene en "forureningsret", som de så kunne købe tilbage via passende økonomisk støtte. Dette synspunkt har været mere eller mindre direkte udtrykt under klimaforhandlinger (side 34-35).

Men der er mere i dét, for hvordan beregner og fordeler man overhovedet udslipstilladelsen? Allerede før arbejdet med en klimakonvention (side 33) spurgte de to indiske forskere Argawal og Narain i bogen "Drivhuseffekten i en ulige verden - et eksempel på miljøkolonialisme" (figur 28):

*"Kan man 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 trækoxer og rismarker i Vestbengalen eller Thailand?"*

Alle er klare over de moralske og politiske aspekter i denne sag, men drivhuseffekten har ingen moral, og det kan ikke bortforklares, at selvom I-landene indtil nu har haft de største udslip, er det på længere sigt udviklingen i U-landene der bliver afgørende.

Tilvæksten i nye kraftværker i OECD-landene er kun af størrelsesordenen 1/3 af væksten i udviklingslandene. Kul er det dominerende brændsel. Det skønnes således at i løbet af de næste 10 år vil Kina's kulfyrede kraftværkskapacitet stige med 75 % GWe. En tilsvarende vækst forventes i Indien. (Couch, 1999).

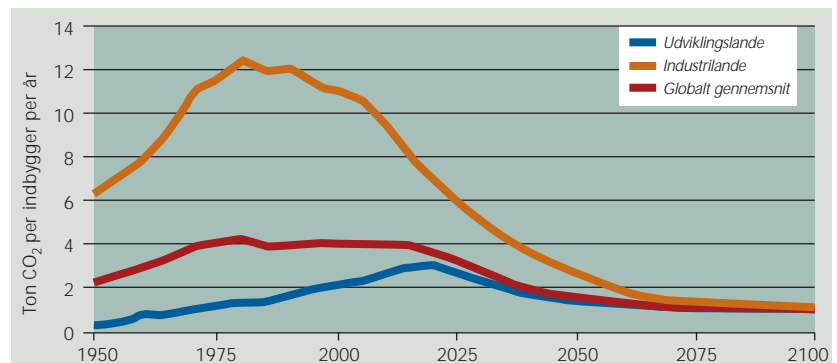
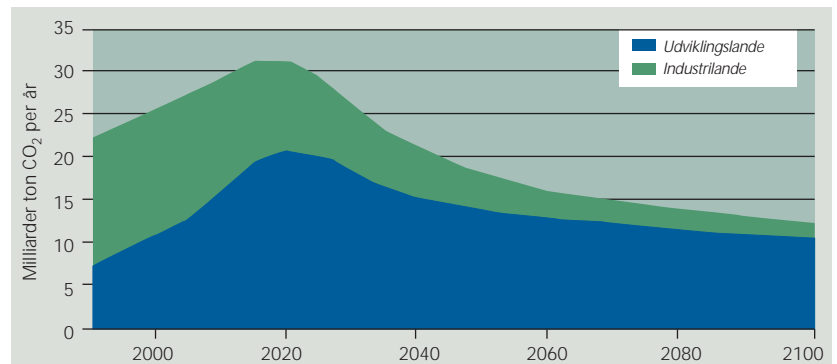
## Energistyrelsens regneeksempel

IPCC's stabiliseringsscenarier (figur 20, side 25) gav ikke noget bud på, hvordan man skulle opnå de givne mål. I et mere specifikt regneeksempel (figur 29) har den danske Energistyrelse vist hvad der kræves, hvis man vil stabilisere CO<sub>2</sub>-koncentrationen på 450 ppm i år 2100. Det totale globale CO<sub>2</sub>-udslip skal næsten halveres. Hvis man så yderligere antager, at alle Jordens indbyggere skal have ret til samme udslip, betyder det at gennemsnittet for I-landenes indbyggere skal reduceres til 1/10 af det nuværende!



Figur 28. Konflikten mellem I- og U-landenes interesser i klimaspørgsmål blev omkring 1990 provokerende rejst i bogen "Drivhuseffekten i en ulige verden".

Figur 29. Et emissionsscenario, hvor CO<sub>2</sub>-koncentrationen stabiliseres på 450 ppm, og hvor det forudsættes at alle jordens beboere har samme udslip i år 2100. (Efter: Energistyrelsen 1995).



# Fra "Vores fælles fremtid" til "Klimakonventionen"

Selvom man i siden slutningen af det 19. århundrede havde været klar over mulighederne for menneskeskabte klimaændringer (figur 30), kom den egentlige videnskabelige og politiske forståelse af problemernes omfang først omkring 1980.

## "Brundtland-rapporten"

Det folkelige gennembrud skete i 1987 med den såkaldte Brundtland Kommissions udgivelse af sin rapport "Vores fælles fremtid". Rapporten, der var blevet udarbejdet af Verdenskommissionen for miljø og udvikling nedsat af FN, gav den hidtil mest omfattende vurdering af verdens miljøproblemer. Det voksende befolkningstal og den stigende fattigdom ses som nogle af de mest alvorlige problemer. Men medens man tidligere havde betrag-

tet den tekniske udvikling som en trussel mod miljøet og havde diskuteret grænser for vækst, så man nu problemerne under en synsvinkel, hvor en kontrolleret, "bæredygtig" vækst blev erkendt som en forudsætning for kampen mod fattigdom og miljønedbrydning.

Kommissionens hovedanbefaling på energiområdet var at industri-

landenes energiforbrug per indbygger skulle halveres inden for 40 år (dvs inden år 2030) og fortrinsvis dækkes med vedvarende energikilder.

En sådan udvikling skulle angiveligt give mulighed for en stigning i udviklingslandenes energiforbrug per indbygger på 30% inden for rammerne af en bæredygtig udvikling. Da de højtudviklede industrilande, og herunder Danmark, skønsomt sender fem gange så meget CO<sub>2</sub> per indbygger som udviklingslandene og tre gange så meget som verdensgennemsnittet (figur 27, side 30), må et sådant scenario anses for et rent politisk regneeksempel.

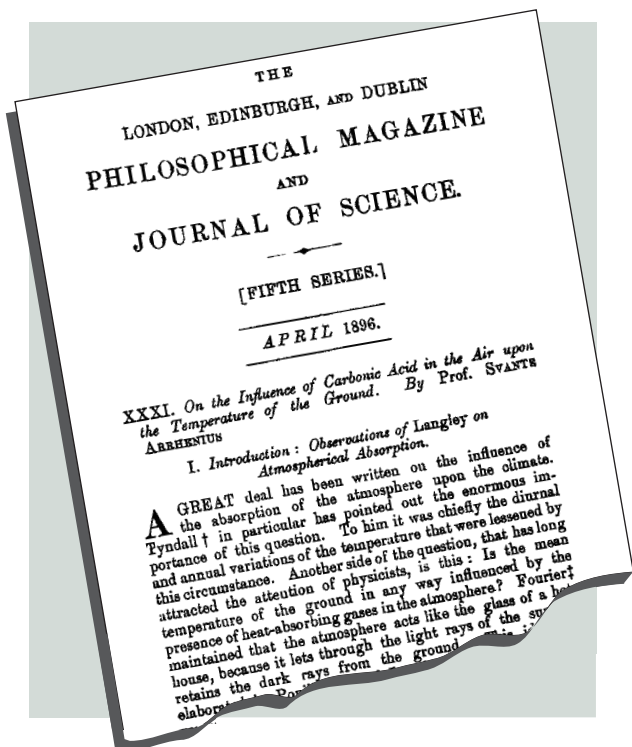
## IPCC

Inspireret af Brundtlandrapporten oprettede FN's organisationer for meteorologi (WMO) og miljø (UNEP) imidlertid i 1988 et klimapanel, "Intergovernmental Panel of Climate Change" (IPCC), hvis opgave skulle være at sammenstille og vurdere den videnskabelige litteratur om alle aspekter ved klimaændringer. Allerede i 1990 kom IPCC's første store rapportering, der vurderede at i et såkaldt "Business as usual" scenario (den fuldt optrukne kurve i figur 19, side 24) ville verden blive 2-4,5°C varmere. Senere er dette bud reduceret til et par °C.

I modsætning til hvad mange tror, foretager IPCC kun videnskabelige vurderinger, men fremkommer principielt aldrig med politiske anbefalinger. Skriften på væggen var dog klar: Kun med drastiske reduktioner i udslippene af drivhusgasser kunne klimaændringer holdes på et acceptabelt niveau.

Figur 30.

Svante Arrhenius klassiske artikel fra 1896 gav den første grundigere beskrivelse af kuldioxidets betydning for klimaet på Jorden. Han fandt at en fordobling af koncentrationen vil give en temperaturstigning på 5-6 °C.



## Klimakonventionen

Efter en række videnskabelige møder - de fleste inden for rammerne af IPCC, blev klimaproblemet behandlet ved FN's verdenskonference om miljø og udvikling i 1992 i Rio de Janeiro. Her underskrev 155 parter en rammekonvention om klimaændringer (UNFCCC), der sigter mod, som det hedder i den officielle oversættelse:

"- en stabilisering af koncentrationerne af drivhusgasser i atmosfæren på et niveau, som kan forhindre farlig antropogen (menneskeskabt) indvirkning på klimasystemet. Dette niveau bør realiseres inden for en tidsramme, der er tilstrækkelig til at sikre, at økosystemerne kan tilpasse sig naturligt til klimaændringerne, at fødevarerproduktionen ikke trues, og til at den økonomiske udvikling kan fortsætte på et bæredygtigt grundlag".

Konventionen udtrykker altså ikke noget konkret globalt mål, og den erkender, at klimaændringer ikke vil kunne undgås helt!

Hvad der så må anses for en acceptabel kombination af "ufarligt", "tilstrækkeligt" og "bæredygtigt" vil givet komme til at bero på en politisk afvejning.

De såkaldte Annex-1 lande, som omfatter OECD og Østeuropa, forpligtede sig dog politisk til at reducere deres udslip af drivhusgasser, så det i år 2000 ikke skulle overstige udslippene i 1990. Det blev endvidere aftalt, at der skal gives finansiell og teknologisk støtte til udviklingslandene, så de bedre kan gennemføre begrænsninger i udslip. De fik derimod ikke nogen konkret målsætning.

## Mellem politik og videnskab

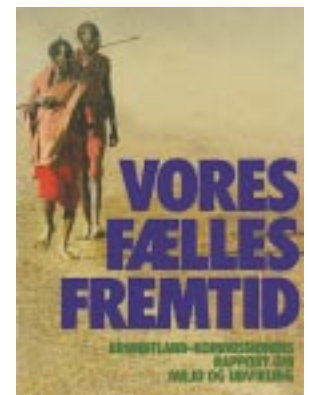
Konventionen trådte i kraft i 1994 og der er efterfølgende afholdt en række møder mellem de underskrivende parter - såkaldte COP (Conference of the Parties).

I dette arbejde tages de videnskabelige resultater i stigende grad i betragtning.

- Man erkender at kuldioxid ikke er den eneste drivhusgas og sammenvejer effekterne.
- Man tager den praktiske konsekvens af det forhold, at drivhusgasser lever så længe i atmosfæren, at det er helt uden betydning, hvor de udsendes. Det er kun det samlede globale udslip der tæller. Derfor skal enkelte lande med reduktionsforpligtelser i fællesskab kunne aftale en samlet reduktionsindsats - såkaldt "joint implementation". De skal også kunne købe udslipstilladelser fra hinanden "emission trading" via omsættelige tilladelser eller krediteres for reduktionsprojekter.
- Endelig er det jo kun det effektive udslip af drivhusgasser, der betyder noget. Følgelig skal etablerede dræn, fx i form af skovrejsning, kunne modregnes i et givet lands udslip. Sådanne dræn behøver ikke nødvendigvis ligge i landet selv, men kan - ved hjælp af de økonomiske instrumenter - etableres i et andet land.

Disse "fleksibilitets-mekanismer" er alle *i princippet* fornuftige tiltag, som skal sikre en omkostningseffektiv indsats. *I praksis* er de bare ikke uden komplikationer, fordi de er svære at kontrollere, og fordi de åbner mulighed for u hensigtsmæssig vækst i I-lande. Endelig er der nogen, der finder det moralsk forkert, at man skal kunne købe sig ret til forurening.

Figur 31. Brundtland rapporten fra 1987 introducerede begrebet "bæredygtig vækst" (sustainable development).



# Kyoto-aftalen og derefter

## COP-3

Den tredje, og foreløbig vigtigste, partskonference fandt sted under stor medieopmærksomhed i Kyoto, Japan i december 1997 og blev afsluttet med vedtagelsen af en protokol. Denne omfatter foruden kuldioxid (CO<sub>2</sub>) metan (CH<sub>4</sub>), lattergas (N<sub>2</sub>O) samt hydrogenfluorcarboner (HFC), perfluorcarboner (PFC) og svovlhexafluorid (SF<sub>6</sub>). Freonforbindelser, der både er drivhusgasser og nedbryder ozonlaget, blev ikke behandlet, fordi de allerede reguleres inden for rammerne af den såkaldte Montreal-protokol.

Ved konferencen vedtog man som opfølgning af protokollen, at der skulle udarbejdes forslag til bestemmelser, regler og vejledning i forbindelse med CO<sub>2</sub>-dræn, om sættelige emissionstilladelser og "joint implementation"

## Udslipsbegrænsninger

Hvad angår konkrete udslipsbegrænsninger blev der imidlertid kun opnået beskedne resultater. De industrialiserede lande inklusive Rusland og Østeuropa skal i fællesskab reducere deres samlede udslip af drivhusgasser - omregnet til CO<sub>2</sub> - med 5,2% for perioden år 2008-2012 i forhold til 1990. Som gennemsnit skal EU-landene reducere deres udslip af drivhusgasser med 8%. Andre OECD-lande og lande med overgangøkonomi kan slippe billigere. Enkelte lande fik tilladelse til direkte udslipsforøgelser.

Tabel 7 viser resultatet af Kyoto-forhandlingerne samt den efterføl-

gende byrdefordeling inden for 8% rammen mellem de enkelte EU-lande. Man ser at der er tale om både stor tilladt vækst i mindre udviklede områder (Portugal, Grækenland, Spanien) og store reduktioner i andre (Luxembourg, Tyskland, Danmark). Tabellen viser endvidere, hvordan den faktiske udvikling var i perioden 1990-1995.

Udviklingslandene fik ingen konkret målsætning. Når man derefter konstaterer (tabel 8) at deres udslip af CO<sub>2</sub> udgør omkring en tredjedel af det globale, og at det steg med 25% i perioden 1990-95, er der grund at frygte at væksten i U-landenes udslip vil overskygge reduktionerne i I-landene. Hertil kommer, at det endnu ikke er afklaret, hvordan man skal holde parterne fast på de aftalte begrænsninger i udslippene.

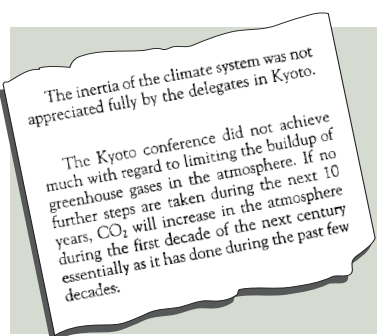
## "Varm luft"

En anden væsentlig svaghed ved Kyoto-protokollen er at det lykkedes Rusland og Ukraine at fastholde deres udslip fra 1990. Rent faktisk er der siden Sovjetunionens sammenbrud sket et mærkbart fald i landenes udslip. Det efterlader en uudnyttet emissionsmulighed - såkaldt "varm luft", der nu kan sælges til fx USA, som derved kan undlade ellers nødvendige reduktioner. Situationen demonstrerer samtidigt de uheldige sider ved mulighederne for handel med udslipstilladelser.

## En kritisk vurdering

Den afgående formand for IPCC, svenskeren Bert Bolin, skrev da også efterfølgende i det internationale tidsskrift "Science" (om end i mere diplomatiske vendinger figur 32):

Figur 32.  
Udklip fra den afgående IPCC formand Bert Bolins vurdering af Kyoto-mødet i det internationale tidsskrift Science (vol. 279, side 330-331).





- at politikerne generelt set ikke syntes at have fattet problemernes omfang og tids-horisont (I parentes bemærket synes det-te at gælde mange andre end politikere) og
- at de indgåede aftaler i sig selv ikke vil have nogen nævneværdig effekt.

## COP-4

Den fjerde partskonference i Buenos Aires i november 1998 fortsatte behandlingen af de problemstillinger, der blev bragt op på Kyoto-mødet, men gav ikke noget principielt nyt.

Inden konferencen havde ca. 60 lande underskrevet Kyoto-aftalen og under mødet gjorde USA's præsident det også. Men ingen underskrifter er bindende, før landenes parlamenter har ratificeret (godkendt) aftalen, og det amerikanske senat har klart tilkendegivet, at det vil man ikke gøre, før væsentlige udviklingslande har afgivet "meningsfulde tilkendegivelser om udslipsbegrænsninger". Denne fundamentale konflikt mellem I- og U-lande er stadig uafklaret og manifesterer sig i U-landenes forståelige interesse i at udnytte klimaafalterne til at opnå større økonomisk og teknologisk støtte.

## Behov for en helhedsvurdering

Disse foreløbig lidt nedslående resultater er ikke i sig selv et argument mod at ofre ressourcer på en opbremsning af udviklingen. Alt tyder på, at klimaændringer ikke vil kunne undgås helt, men at enhver opbremsning vil gøre en tilpasning lettere. Desværre opfatter nogle stadig diskussioner om tilpasning som en given op over for den basale målsætning om at forhindre klimaændringer - og dermed som "politisk ukorrekte". En sådan holdning er helt forældet. Der er en voksende erkendelse i den videnskabelige verden af, at klimaproblematikken ikke kun er et problem

om reduktioner af udslip af drivhusgasser. Den skal ses under en helhedssynsvinkel med inddragelse af muligheder for tilpasning til både naturlige og menneskeskabte klimaændringer.

Land	Mål 2008-12	Observeret 1990-95
EU	-8	-1
Østrig	-13	-3
Belgien	-7,5	
Danmark	-21	+18
Finland	0	+3
Frankrig	0	-4
Tyskland	-21	-9
Grækenland	+25	+7
Irland	+13	-1
Italien	-6,5	-1
Luxemburg	-28	
Holland	-6	+7
Portugal	+27	+49
Spanien	+15	+14
Sverige	+4	+7
England	-12,5	-4
<b>OECD-lande udover EU</b>	<b>+8</b>	
Australien	+8	+8
Canada	-6	+9
Island	+10	-4
Japan	-6	+8
New Zealand	0	+16
Norge	+1	-9
Schweiz	-8	-5
USA	-7	+7
<b>Overgangsøkonomier</b>	<b>+8</b>	
Bulgarien	-8	
Kroatien	-5	
Tjekkiet	-8	-23
Estland	-8	
Ungarn	-6	-15
Letland	-8	
Polen	-6	
Rumænien	-8	
Rusland	0	
Slovakiet	-8	
Slovenien	-8	
Ukraine	0	
<b>Udviklingslande</b>	<b>-</b>	<b>+25</b>

	1990	1995
EU	949	936
OECD uden EU	2.086	2.254
Overgangsøkonomier	1.311	925
Udviklingslande	1.774	2.225

Tabel 8.  
Globale CO<sub>2</sub>-udslip i megatons kulstof per år.  
(Efter Bolin, 1998).

Tabel 7.  
Udslipsbegrænsninger i forhold til 1990 som aftalt ved Kyoto-konferencen i 1997. Der er yderligere vist den efterfølgende byrdefordeling mellem EU-landene, samt de faktiske ændringer i udslip i perioden 1990-1995. Alle tal er % CO<sub>2</sub>-ækvivalenter, dvs. de omhandlede stoffer er omregnet til kuldioxid.  
(Delvis efter Bolin, 1998).

# Konklusion

---

Den ganske almindelige kemiske forbindelse kuldioxid med formlen  $\text{CO}_2$  er kommet til at spille en dobbeltrolle i den almindelige bevidsthed.

*På den ene side* er stoffet en nødvendig forudsætning for højere liv på Jorden - dels fordi det er et fundamentalt led i den fotosyntese, som opbygger plantemateriale - dels fordi det som en drivhusgas medvirker til at holde Jorden på en hensigtsmæssig temperatur. *På den anden side* er  $\text{CO}_2$  blevet ud-råbt til tidens største miljøtrussel, der netop gennem sit bidrag til drivhuseffekten vil ændre betingelserne for mennesker og natur på hele kloden.

Intet under at den offentlige og politiske debat undertiden forvirres af en række misforståelser!

Forklaringen skal søges i kulstofs komplicerede globale kredsløb, der hidtil har været i balance og i lange perioder har opretholdt en konstant koncentration af  $\text{CO}_2$  i atmosfæren. Menneskelige aktiviteter - og specielt den stigende anvendelse af fossile brændsler - bevirker imidlertid nu en langt hurtigere udsendelse af  $\text{CO}_2$  end de naturlige mekanismer, der igen fjerner  $\text{CO}_2$ , kan følge med til. Resultatet er blevet en gradvis stigning i den atmosfæriske koncentration, siden industrialiseringen tog fart i midten af det 19. århundrede.

Med kendskab til mekanismerne i de globale stofkredsløb kan man, om end med store usikkerheder, beregne de fremtidige koncentrationer. Det kan gøres på to måder: Man kan antage en teknologisk og samfundsmæssig udvikling og derefter bestemme de resulterende koncentrationer. Men

man kan også foreskrive koncentrationerne og derefter beregne, hvilke globale  $\text{CO}_2$ -udslip det vil tillade.

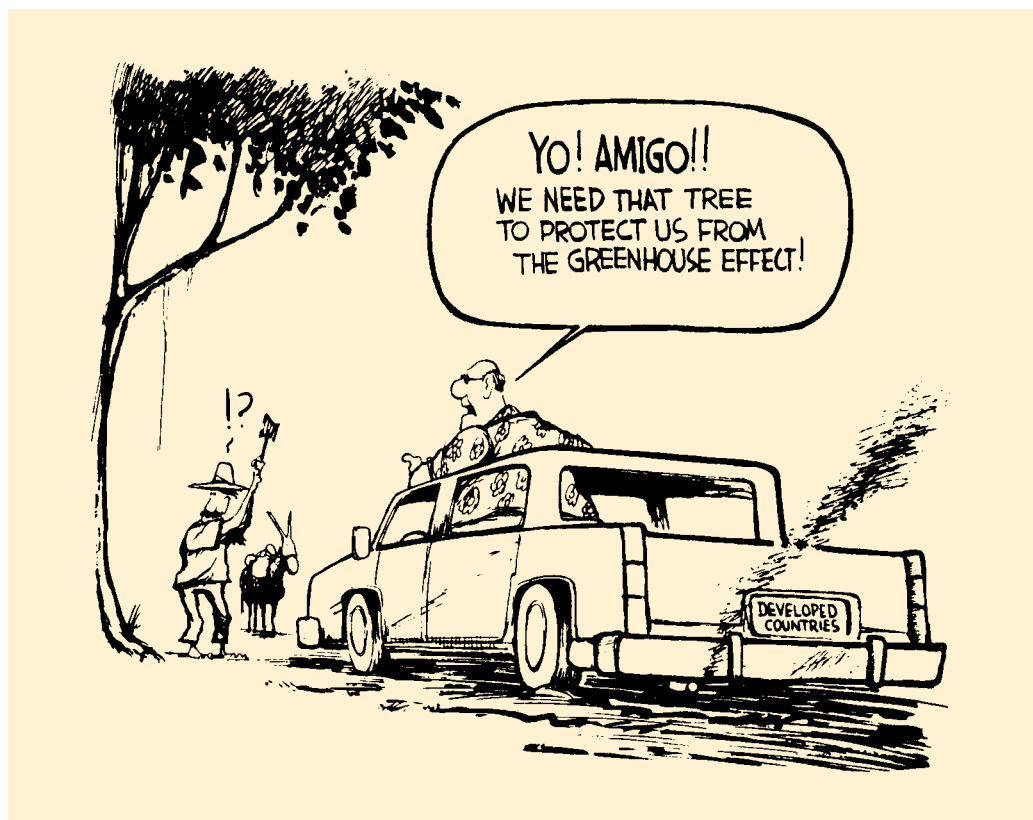
Uanset fra hvilken ende problemet angribes, er resultaterne nedslående. Hvis man skal sikre, at klimaændringerne ikke bliver uacceptable, må det globale  $\text{CO}_2$ -udslip i løbet af de næste par hundrede år reduceres til omkring en fjerdedel af det nuværende. Og det skal ske samtidigt med at Jordens befolkning næsten fordobles, og at udviklingslandene får en væsentligt forbedret materiel levestandard.

Resultatet kan blive at I-landenes udslip per indbygger må reduceres til omkring en tiendedel af det nuværende. Energibesparelser og udbygning af etablerede alternative energikilder som vindkraft kan hjælpe os et stykke ad vejen. Men der skal formentlig helt nye teknologier på bordet. Der er et spektrum af lovende muligheder, og det har fået nogle til at foreslå, at det vil være økonomisk fordelagtigt at vente med større indgreb til den nye teknologi er på plads. Det er en farlig vej, for det er netop truslen om indgreb, der kan være en afgørende igangsætter til udvikling af teknologien.

Et centralt problem er her situationen i udviklingslandene, der forståeligt nok prioriterer øjeblikkelig vækst højere end langsigtet klimapolitik. Selvom det indtil nu klart har været I-landene, der har haft hovedansvaret for forøgelsen af drivhuseffekten, vil det på længere sigt være U-landenes voksende befolkninger og deres økonomiske og teknologiske udvikling, der bliver afgørende.

Internationale aftaler udformes inden for rammerne af den Klimakonvention som blev underskrevet af 155 parter ved FN's konference i Rio de Janeiro i 1992. Aftalerne omfatter ikke alene CO<sub>2</sub>, men også andre drivhusgasser. De går også videre end til blot at kræve begrænsning af udslip ved at omfatte forskellige former for udslipfordeling og handel med udslipstilladelser. Det skal angiveligt gøre begrænsningerne mere omkostningseffektive, men er ikke uden politiske komplikationer. Af størst betydning er måske forpligtelser til overførsel af bæredygtig teknologi til U-lande.

Alt i alt er der tale om skridt i den rigtige retning, men endnu er de opnåede resultater helt utilstrækkelige i forhold til problemets omfang og langsigtede karakter.



Et afgørende spørgsmål er relationerne mellem I-lande og U-lande. Det dukker op i mange sammenhænge: Befolkningsvækst, stigende levestandard, fordeling af udslipstilladelser - og som her i en ofte vist tegning: Fældning af regnskove.

# Litteratur

Listen indeholder både litteratur, der er henviset til i teksten, og forslag til supplerende læsning. Generelt kan anbefales andre Temarapporter fra DMU. Grundigere behandlinger med mange yderligere referencer er givet i rapporter fra IPCC. Brug her IPCC, 1998 som indgang.

- Argawal, A. og Narain, S. 1991.** Drivhuseffekten i en ulige verden - Et eksempel på miljøkolonialisme. Dansk udgave udgivet af Mellemfolkeligt Samvirke, København.
- Berner, R.A., Lasaga, A.C. 1989.** Modelling the Geochemical Carbon Cycle. *Scientific American*. Marts 1989 s. 54-61.
- Bolin, B. 1998.** The Kyoto negotiations on climate change: A science perspective. *Science* 279, 330-331.
- Brundtland Kommissionen 1987.** Vores fælles fremtid. FN-forbundet og Mellemfolkeligt Samvirke. København.
- Couch, G. 1999.** Non-OECD coal-fired power generation - trends in the 1990s. CCC/18.
- Danmarks Nationaleleksikon A/S 1994.** Den Store Danske Encyklopædi (Artikler om Jorden, atmosfæren m.m.) Gyldendal, København.
- Dixon, R.K. m.fl. 1994.** Carbon Pools and Flux of Global Forest Ecosystems. *Science* 263, 185-190.
- Ellis, J. og Tréanton, K. 1998.** Recent trends in energy-related CO<sub>2</sub> emissions. *Energy Policy* 26, 159-166.
- Energistyrelsen 1995.** Danmarks Energifremtider. Miljø- og Energiministeriet, København.
- Energistyrelsen 1999.** Opfølgning på Energi 21. Status for energiplanlægning. Miljø- og Energiministeriet, København.
- Fenger, J., Tjell, J.C. (redaktører) 1994.** Luftforurening. Polyteknisk Forlag, Lyngby.
- Fenger, J. 1995.** Ozon som luftforurening. Temarapport fra DMU 3/1995. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde.
- Fenger, J., Jørgensen, A.M.K., Halsnæs, K. (redaktører) 1996.** Drivhuseffekt og klimaændringer. Betydningen for Danmark set i lyset af IPCC's 1996-rapporter. Miljøstyrelsen, København.
- Fenger, J. 1997.** En atmosfære med voksende problemer - Historien om luftforurening. Temarapport fra DMU 11/1997. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde.
- Fenhann, J. et al. 1997.** Samfundsøkonomiske omkostninger ved reduktion af drivhusgasudslip. Miljøprojekt nr. 373. Miljøstyrelsen, København.
- Grace, J. og Malhi, Y. 1999.** The role of rain forests in the global carbon cycle. *Progress in Environmental Science* 1, 177-193.
- Greadel, T.E., Crutzen, P.J. 1995.** Atmosphere, Climate, and Change. Scientific American Library, New York.
- Heimann, M. (red.) 1993.** The Global Carbon Cycle. Springer Verlag, Berlin Heidelberg.
- Illerup, J.B., Winther, M., Lyck, E., Fenger, J. 1999.** Hvor kommer luftforureningen fra? Fakta om kilder, stoffer og mængder. Temarapport fra DMU 30/1999. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1995.** *Climate Change 1994*. Kapitel 1, CO<sub>2</sub> and the Carbon Cycle. Cambridge University Press, Cambridge.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) 1998.** IPCC's Anden Hovedrapport Klimaændringer 1995. En rapport fra det Mellemstatslige Panel om Klimaændringer. Dansk oversættelse af "IPCC Second Assessment, Climate Change 1995" ved J. Fenger m.fl. Udgivet af Energimiljørådet, København. Samtidig har Energimiljørådet udgivet en populær version: IPCC og globale klimaændringer - en indføring. Den er skrevet af Hanna Sigga Madslund.
- Jensen, M., Gudmundsson, H., Fenger, J., Christensen, L. 1998.** Bilisme og miljø - en svær balance. Temarapport fra DMU 18/1998. Danmarks Miljøundersøgelser, Roskilde.
- Keeling, R.F., Shertz, S.R. 1992.** Seasonal and interannual variations in atmospheric oxygen and implications for the global carbon cycle. *Nature* 358, 723-727.
- Lovelock, J. 1992.** Jordens overlevelse. Politikens Forlag, København.
- Lutz, W., Sanderson, W., Scherbov, S. 1997.** Doubling of world population unlikely. *Nature* 387, 803-804.
- Mackenzie, F.T. 1998.** Our Changing Planet. Prentice Hall, Upper Saddle River.
- Miljø & Energiministeriet 1996.** *Energi 21*. Regeringens energihandlingsplan 1996. Energistyrelsen, København.
- Moftat, A.S. 1996.** Ecologists Look at the Big Picture. *Science* 273, 1490.
- Moore, B. III, Braswell, B.H. Jr. 1994.** Planetary Metabolism: Understanding the carbon Cycle. *Ambio* 23,1, 4-12.
- Rosing, M. 1999.** Det første liv på Jorden. *Naturens Verden*. Hefte 3, 2-7.
- Sundquist, E.T., Broecker, W.S. (redaktører) 1985.** The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variations Archaean to Present. Geophysical Monograph 32. American Geophysical Union, Washington, D.C.
- The Met. Office 1998.** Climate Change and its impacts. Some highlights from the ongoing UK research programme: a first look at results from the Hadley Centre's new climate model.
- Udenrigsministeriet 1994.** Bekendtgørelse af FN's rammekonvention af 9. juni 1992 om klimaændringer. Udenrigsmin. Miljøsekr. J.nr. 46.B.87.c.

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

Henvendelse kan rettes til:

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

## **Danmarks Miljøundersøgelser**

Frederiksborgvej 399  
Postboks 358  
4000 Roskilde  
Tlf. 4630□1200  
Fax 4630□114

*Direktion*

*Personale- og Økonomisekretariat*  
*Forsknings- og udviklingssektion*  
*Afd. for Systemanalyse*  
*Afd. for Atmosfærisk Miljø*  
*Afd. for Miljøkemi*  
*Afd. for Havmiljø*  
*Afd. for Mikrobiel Økologi og Bioteknologi*

## **Danmarks Miljøundersøgelser**

Vejlsøvej 25  
Postboks 314  
8600 Silkeborg  
Tlf. 8920□1400  
Fax 8920□1414

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

## **Danmarks Miljøundersøgelser**

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

*Afd. for Landskabsøkologi*  
*Afd. for Kystzoneøkologi*

## **Danmarks Miljøundersøgelser**

Tagensvej 135, 4. sal  
2200 København N  
Tlf. 3582□1415  
Fax 3582□1420

*Afd. for Arktisk Miljø*

### **Publikationer**

DMU udgiver temarapporter, faglige rapporter, arbejdsrapporter, tekniske anvisninger, årsberetninger samt et kvartalsvis nyhedsbrev, DMU Nyt. En oversigt over DMU's publikationer og aktuelle aktiviteter kan findes på DMU's hjemmeside. Årsberetning og DMUNyt er gratis.



# Tidligere TEMA-rapporter fra DMU



- |         |  |         |   |
|---------|--|---------|---|
| 1/1994  | Kvælstof tilførsel til Limfjorden<br><i>Brian Kronvang m.fl., 16 sider. Udsolgt.</i>   | 16/1997 | Luftkvalitet i danske byer<br><i>Finn Palmgren m.fl., 64 sider, kr. 90,-.</i>   |
| 2/1994  | Luftforurening i danske byer,<br><i>Kåre Kemp m.fl., 42 sider, kr. 100,-.</i>  | 17/1998 | Olieforsknings og miljø i Vestgrønland<br><i>David Boertmann m.fl., 56 sider, kr. 80,-.</i>                                   |
| 3/1995  | Ozon som luftforurening<br><i>Jes Fenger, 48 sider, kr. 80,-.</i>  | 18/1998 | Bilisme og miljø – en svær balance<br><i>Mette Jensen m.fl., 48 sider, kr. 60,-.</i>  |
| 4/1996  | Tungmetaller i danske jorder,<br><i>John Jensen m.fl., 40 sider, kr. 100,-.</i>  | 19/1998 | Kemiske stoffer i landbruget<br><i>John Jensen m.fl., 32 sider, kr. 40,-.</i>   |
| 5/1996  | Forureningsbekæmpelse med mikroorganismer<br><i>Ulrich Karlson m.fl., 32 sider. Udsolgt.</i>   | 20/1998 | Naturen og landbruget<br><i>Rasmus Ejrnæs m.fl., 76 sider, kr. 100,-.</i>   |
| 6/1996  | Status og jagttider for danske vildtarter<br><i>Jesper Madsen m.fl., 112 sider, kr. 110,-.</i>   | 21/1998 | Skov og skovvandløb<br><i>Nikolai Friberg, 32 sider, kr. 40,-.</i>  |
| 7/1996  | Naturens tålegrenser for luftforurening<br><i>Morten Strandbjerg og Lisbeth Mortensen, 40 sider, Kr. 60,-.</i>                         | 22/1998 | Hvordan står det til med naturen?<br><i>Michael Stoltze, 76 sider, kr. 100,-.</i>   |
| 8/1996  | Anskydning af vildt<br><i>Henning Noer m.fl., 52 sider, kr. 80,-.</i>  | 23/1998 | Gensplejede planter<br><i>Christian Damgaard m.fl., 40 sider, kr. 60,-.</i>   |
| 9/1996  | Kvælstofbelastning af havmiljøet<br><i>Henrik Paaby og Flemming Møhlenberg, 40 sider, Kr. 60,-.</i>                                    | 24/1999 | Danske søer og deres restaurering<br><i>Martin Søndergaard m.fl., 36 sider, kr. 50,-.</i>                                     |
| 10/1996 | Havets usynlige liv<br><i>Åke Hagström m.fl., 33 sider, kr. 50,-.</i>  | 25/1999 | Tropisk diversitet - skov og mennesker i Ecuador<br><i>Flemming Skov m.fl., 56 sider, kr. 80,-.</i>                           |
| 11/1997 | En atmosfære med voksende problemer..., luftforureningens historie<br><i>Jes Fenger, 64 sider, kr. 90,-.</i>                           | 26/1999 | Bekæmpelsesmidler - anvendelse og spredning i miljøet<br><i>Betty Bügel Mogensen m.fl., 48 sider, kr. 60,-.</i>               |
| 12/1997 | Reservatnetværk for vandfugle<br><i>Preben Clausen m.fl., 52 sider, kr. 80,-.</i>  | 27/1999 | Giftige alger og algeopblomstringer<br><i>Hanne Kaas m.fl., 64 sider, kr. 80,-.</i>   |
| 13/1997 | Næringsstoffer – arealanvendelse og naturgenopretning<br><i>Brian Kronvang m.fl., 40 sider, kr. 60,-.</i>                              | 28/1999 | Dyreplankton i danske farvande<br><i>Torkel Gissel Nielsen, m.fl., 64 sider, kr. 80,-.</i>                                    |
| 14/1997 | Mikrobiologiske bekæmpelsesmidler i planteproduktion – muligheder og risici<br><i>Niels Bohse Henriksen m.fl., 28 sider, kr. 40,-.</i> | 29/1999 | Hvor kommer luftforureningen fra? Fakta om kilder, stoffer og udvikling...<br><i>Jytte Illerup m.fl., 32 sider, kr. 40,-.</i> |
| 15/1997 | Kemikalier i hverdagen<br><i>Suresh C. Rastogi m.fl., 40 sider, kr. 60,-.</i>  | 30/1999 | Bundmaling til skibe - et miljøproblem<br><i>Signe Foverskov m. fl., 48 sider, kr. 60,-.</i>                                  |

De enkelte hæfter i serien 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.