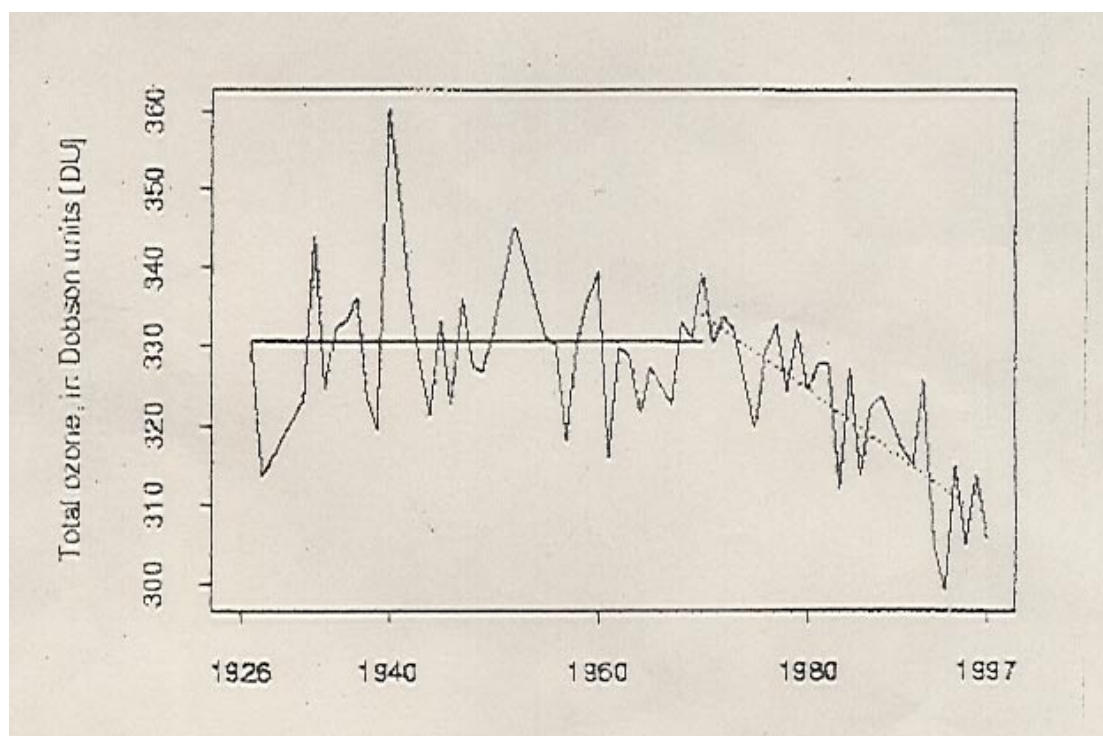


2.5 Nedbrydning af Ozonlaget

Den totale mængde ozon over et givet sted kaldes ozonsøjlen. Den er højden af ozonmængden omregnet til standard betingelser (d.v.s. 0°C og 1013 hPa.) og angivet i hundrededele millimeter - såkaldte Dobson-enheder (DU). I daglig tale anvendes ofte "millimeter" angivet ved samme betingelser. Typiske værdier er omkring 300 DU. Ozonsøjlen er kun halvt så stor over ækvator som over Nordpolen i april og maj måned. På andre tider af året (september-oktober) har ozonsøjlen næsten samme tykkelse de to steder.

Den menneskelige påvirkning af ozonlaget

Selvom eksistensen af et ozonlag i stratosfæren havde været kendt længe, var det først med en målekampagne i det geofysiske år 1957 at der blev foretaget grundigere undersøgelser, og at man blev opmærksom på et muligt fald i ozonmængden (figur 2.5.1).



Figur 2.5.1. Måling af ozon over Arosa i Schweiz fra 1926 til 1997, hvor der indtil 1973 kun var mindre udsving fra et gennemsnit på 326 DU. I 1973 begyndte mængden af ozon imidlertid at falde med gennemsnitligt ca. 0,3 % om året. (Kilde:<http://www.lapeth.ethz.ch/doc/totozon.html>).

I 1974 foreslog Molina og Rowland, at stratosfærisk ozon kunne nedbrydes af chlor frigjort ved fotolyse af CFC-gasser, der er kemisk inerte forbindelser med et højt damptryk ved stuetemperatur. Det betyder at de ved udslip overgår direkte til gasfasen. Det gør dem velegnede til en række tekniske anvendelser, men er også afgørende for deres miljøskadelige effekter. Den lange atmosfæriske levetid (40 - 150 år) betyder, at de kan transporteres til stratosfæren, hvor de fotolyses af UV-lys, hvorved der dannes chloratomer, der katalyserer nedbrydning af ozon, specielt i en højde af 35-45 km over Jorden. Da den største mængde ozon findes i lavere højde (15-25 km), ventede man derfor kun at se et mindre fald i den totale mængde ozon pga. CFC-gasser. Det skulle vise sig at være en fejltagelse!

Ozonhullet over Antarktis

I begyndelsen af 1980erne blev det klart at effekten var langt alvorligere. Overraskende nok skete det på Antarktis, hvor det viste sig at op til 50% af den totale mængde ozon var forsvundet over få uger i forårs-perioden. Det skyldes at der er tale om såkaldte heterogene kemiske reaktioner på overfladen af partikler i stratosfæren.

I vinterperioden dannes der over Antarktis et vindsystem, hvor vindene cirkulerer omkring Sydpolen. I det indre af denne såkaldte vortex er der meget lave temperaturer, og der dannes skyer af partikler, der virker som et reservoir for ozonnedbrydende forbindelser. Når temperaturen stiger om foråret (efteråret hos os) frigøres forbindelserne og fører til det såkaldte ozonhul over Antarktis, som nu er en årligt tilbagevendende begivenhed. På internettet kan man få adgang til de nyeste måleresultater vedrørende ozonlaget over Antarktis samt opdaterede dokumenter om emnet. (Se www-adresser).

Ozon over Arktis

Umiddelbart skulle man tro, at ozonnedbrydningen var størst på den nordlige halvkugle, hvor der er de fleste forureningskilder, men rent faktisk nedbrydes ozon ikke lige så hurtigt i stratosfæren over Arktis som over Antarktis. Det skyldes at Jordens to polære områder er forskellige: Antarktis er et kontinent omgivet af oceaner, medens Arktis er et hav omgivet af kontinenter. Det betyder, at der ikke bliver så koldt over Arktis om vinteren, varigheden af et ozonhul er oftest kun nogle få uger, koncentrationen på årsbasis er 7-8% mindre. Der er endnu ikke en væsentlig øget gennemsnitlig UV-stråling, hvilket desuden skal ses i lyset af, at den naturlige variation i UV-B stråling varierer med en faktor 10 fra Lofoten i Norge til Kenya ved Ækvator.

Potentialer for ozonnedbrydning

På samme måde som man kan tillægge drivhusgasser en relativ effektivitet i forhold til kuldioxid i form af et *global warming potential* (GWP) (side xx) kan man tillægge ozonlagsnedbrydende stoffer et *ozone depletion potential* (ODP). Det regnes i forhold til virkningen af CFC-11 (CFCl₃), der er – eller var – det væsentligste stof i denne sammenhæng. ODP for en række ozonlagsnedbrydende stoffer er vist i tabel 2.5.2.

Tabel 2.5.2 Ozon depletations potentialer (ODP'er) for stoffer, som er reguleret af Montreal protokollen

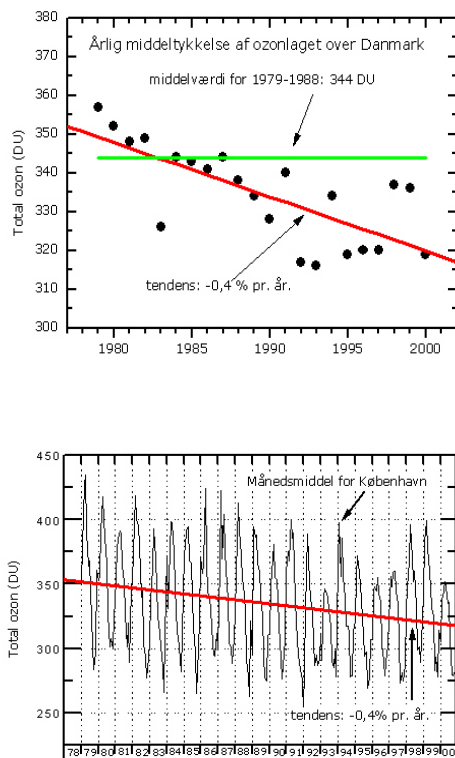
Haloner	0-1	1-2	2-3	3-4	4-5	5-6	6-7	7-8	8-9	9-10	10-11
Carbonflouorcarboner (CFC'er)	••			••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••	••••
Carbontetrachlorid (CCl ₄)	•										
2,2,2-trichlorethan (CH ₃ CCl ₃)	•										
Methylbromid (CH ₃ Br)	•										
Hydrobromoflouorcarboner	••••										
Hydrochloroflouorcarboner (HCFC'er)	••										
Bromochloromethan	•										

Tabel 2.5.2. Eksempler på stoffer der nedbryder ozonlaget. Tallet i navnet er en kode for den kemiske formel. Bemærk at stoffer, der indeholder brint, har kortere levetid og mindre ODP.

Ozonlaget over Danmark

Danmarks Meteorologiske Institut (DMI) måler løbende den totale mængde ozon (ozonsøjlen) over Danmark. Målingerne foretages med jordbaserede spektrometre (såkaldte Dobson og Brewer instrumenter) der benytter ozons absorption i det ultraviolette område til at bestemme koncentrationen. Gennemsnitsværdien for Danmark er 350 DU, men dækker over udsving mellem 200 og 450 DU. Som tidligere nævnt er der store variationer i mængden af ozon i stratosfæren, og i figur 2.x er vist den gennemsnitlige årstidsvariation for ozon over Danmark i årene 1979-1999. Det ses, at mængden er størst om foråret og mindst om efteråret.

Ozonsøjlen over Danmark mindskes i gennemsnit med ca. 0,4% pr. år, lidt mere om foråret og lidt mindre om efteråret. N.B. Fra 1978 og frem til april 1992 er det NASA's værdier der er brugt, medens DMI startede med at måle fra maj 1992 (kontaktperson: Poul Eriksen, DMI)



Figur 2.5.3. Ændringen i ozonsøjlen over Danmark siden slutningen af 1970'erne (Kilde: DMI).

Regulering af CFCer

Den første internationale aftale om at regulere de ozonlagnedbrydende stoffer, Wienkonventionen, blev indgået i 1985. 161 lande har tilsluttet sig Montreal protokollen, som efterfulgte Wien konventionen.

Montreal protokollen omfatter syv grupper af ozonlagnedbrydende stoffer.

- Siden 1995 har det kun været tilladt at anvende CFC-er i medicinske produkter og til laboratorieanalyser.
- Haloner har ikke måttet produceres og importeres i industrilandene siden 1995
- Tetrachlorkulstof har siden 1995 været begrænset til laboratoriebrug. Det samme gælder for trichlorethan.
- Der har været et forbud mod anvendelsen af HBFC-er siden 1996
- HCFC-er og methylbromid skal afvikles over en årrække

Danmark har været langt fremme med afviklingen af ozonlagnedbrydende stoffer. I år 2000 var den eneste tilladte anvendelse således HCFC-er i køleanlæg samt særlige undtagelser for andre stoffer til medicinsk brug eller i laboratorier. Set i forhold til 1986 var forbruget af ozonlagnedbrydende stoffer i 1998 faldet med ca. 98%.

2.6 Drivhuseffekt og menneskeskabte klimaændringer

Den historiske baggrund

Allerede fra midten af 1800-tallet var man klar over, at atmosfærens indhold af kuldioxid var afgørende for Jordens varmebalance, og i slutningen af 1930'erne foretog man de første beregninger af konsekvenserne af de menneskeskabte udslip af kuldioxid. Det vakte dog ikke den store interesse – dels anså man virkningerne for overvejende gunstige, dels var Verden mere optaget af økonomiske kriser og den truende verdenskrig. Først i midten af 1950'erne vågnede den

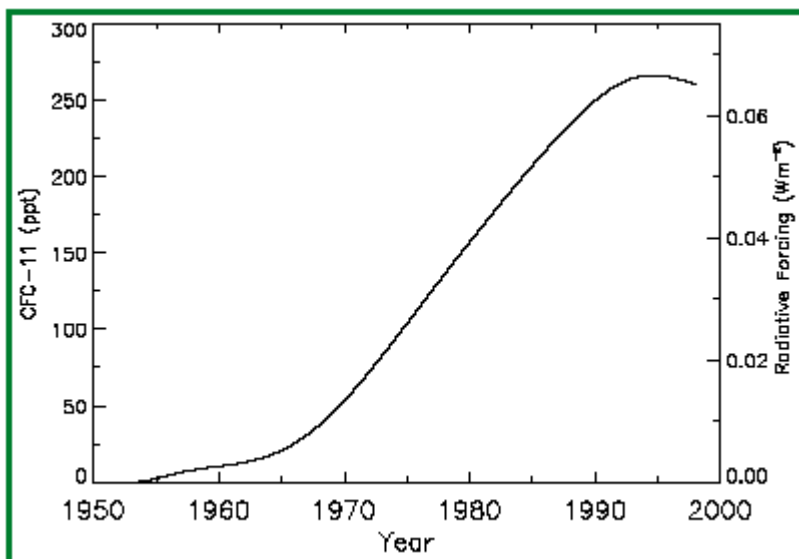
videnskabelige opmærksomhed, og som led i det Internationale Geofysiske År i 1958 begyndte systematiske målinger af luftens indhold af kuldioxid.

En egentlig *politisk erkendelse* af at der kunne være tale om et problem kom først i slutningen af 1980'erne efter udsendelse af den såkaldte Brundtland Rapport fra Verdenskommissionen for Miljø og Udvikling nedsat af De Forenede Nationer. Det førte til oprettelsen af Det mellemstatslige klimapanel (IPCC), der samler og vurderer al den videnskabelige litteratur om klimaændringer og med jævne mellemrum udsender rapporter.

I 1992, 1996 og 2001 udsendte IPCC store samlede vurderinger – såkaldt *assessments*, der danner grundlag for det internationale arbejde med klimakonventionen. Selvom der har været en stigende sikkerhed i IPCC's vurderinger, har det basale budskab været uændret: Uden en kraftig opbremsning og efterfølgende reduktion i de globale udslip af drivhusgasser risikerer vi alvorlige menneskeskabte klimaændringer. Samtidigt er det dog erkendt at et vist mål af klimaændringer ikke kan undgås, og at de skal vurderes i sammenhæng med socio-økonomiske forhold og andre miljøpåvirkninger.

Klimapåvirkningen

De gasser (såkaldte drivhusgasser) som er ansvarlige for den menneskeskabte påvirkning af varmebalancen er som nævnt først og fremmest kuldioxid, hvis koncentration siden industrialiseringen i det nittende århundrede er steget fra 280 til 370 ppmv (ca. 30%). Hovedårsagen er anvendelsen af fossile brændsler, men også ændret arealanvendelse, herunder skovrydninger har spillet en rolle. Koncentrationerne af drivhusgasserne metan og lattergas, der i høj grad er knyttet til landbrugsproduktion, er steget med henholdsvis 150 og 16%. Gruppen af CFC og beslægtede forbindelser, der både nedbryder ozonlaget og er drivhusgasser, var stort set ukendte før 2. verdenskrig (*figur 2.6.1*).



Figur 2.6.1. Den globale middelværdi af CFC-11 koncentrationen i atmosfæren. Efter IPCC,TAR,WG1. Technical summary.

Svovlforurening spiller en dobbeltrolle. På den ene side giver den anledning til forsurening (afsnit 2.4). På den anden side kan sulfataerosoler i atmosfæren gennem refleksion af solstråling modvirke drivhuseffekten. Der er tale om en mere lokalt præget effekt, der derfor er svær at kvantificere. At der også er virkninger på regional skala fremgår af målinger på borekerner af grønlandsk is. Her er koncentrationen af sulfat steget fra 50 mg/ton i slutningen af 1800-tallet til over 200 mg/ton omkring 1980. Herefter er det faldet igen. Mønsteret svarer rimeligt til udviklingen i det globale svovludslip. Tilsvarende viser nyere undersøgelser fra Nordamerika og Europa, at

svovldepositions mængderne er faldende i disse områder, primært som følge af bedre røgrensning og renere brændsler. Den afkølede effekt fra svovlforbindelser i atmosfæren forventes på længere sigt at blive yderligere reduceret som følge af generelle miljøtiltag på området.

Der er imidlertid ikke nogen enkel sammenhæng imellem ændringer i drivhusgassernes koncentrationer og deres påvirkning af energibalancen, fordi de absorberer strålingen ved forskellige bølglængder og med forskellig effektivitet. Desuden er koncentrationen af nogle gasser så høj, at stråling ved nogle bølglængder allerede nu absorberes næsten fuldstændigt; en forøgelse af koncentrationerne vil derfor kun have begrænset effekt. Det skal der tages hensyn til, når man skal vurdere virkningen af ændringer i de forskellige gassers koncentrationer. Endvidere må man tage hensyn til gassernes levetid i atmosfæren – jo længere gasserne lever i atmosfæren, jo større er deres samlede virkning.

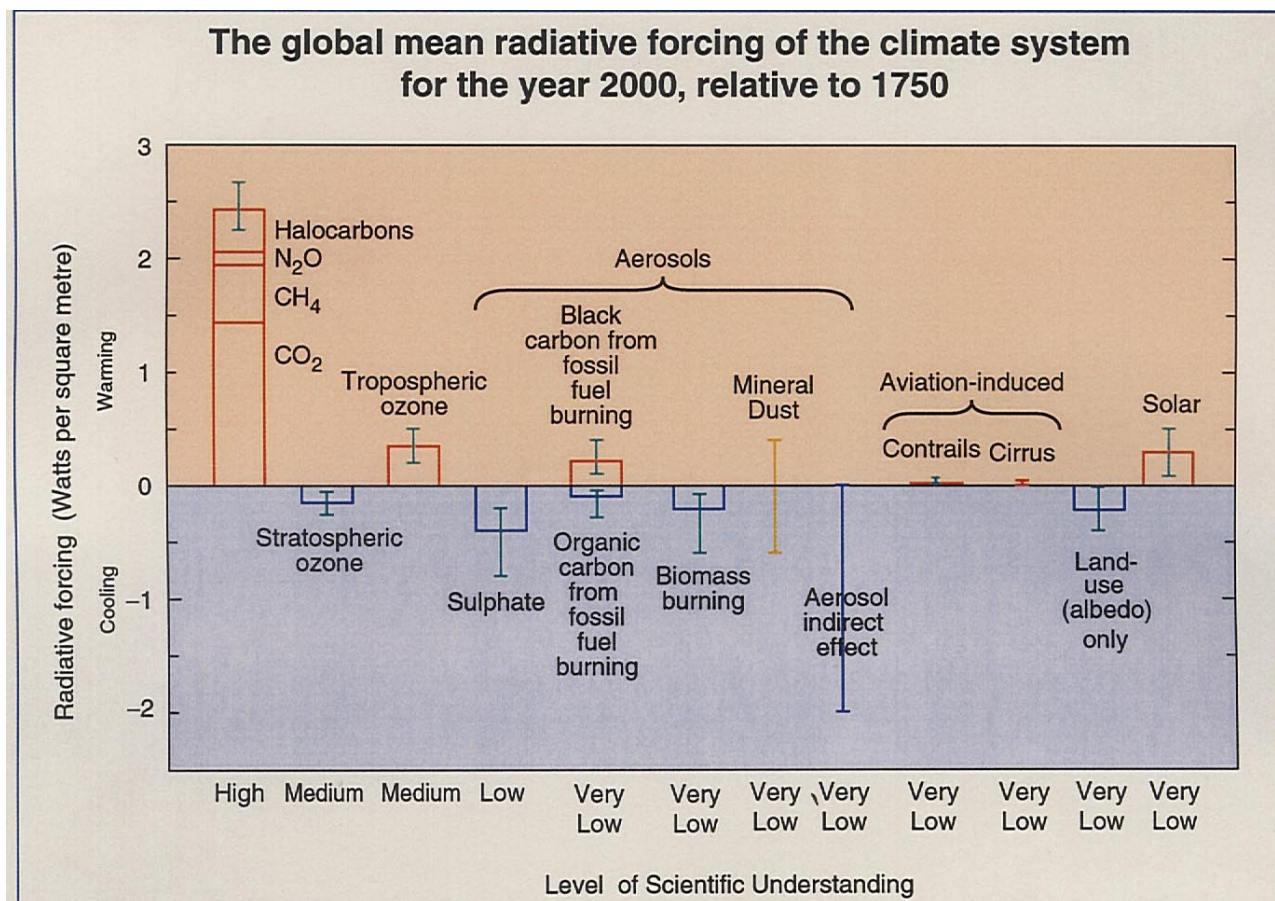
For at kunne sammenligne og sammenveje de enkelte stoffers klimapåvirkning har man defineret et såkaldt *globalt opvarmningspotentiale*, på engelsk *Global Warming Potential (GWP)*, der udtrykker virkningen af en vægtenhed af et givet stof relativt til carbondioxid. Med karakteristiske levetider på af størrelsesordenen 100, 10 og 300 år for henholdsvis kuldioxid, metan og lattergas er det klart at tidshorisonten spiller en afgørende rolle. Typisk vælger man 100 år. Herefter kan man omregne effekten af de forskellige drivhusgasser til en ækvivalent mængde kuldioxid dvs. til den mængde kuldioxid, der vil give samme strålingspåvirkning. De seneste GWP-værdier for en 100-årig tidshorisont er i følge IPCC (2001):

- Kuldioxid, CO₂ : 1
- Methan, CH₄ : 21
- Lattergas, N₂O : 310

For CFC-gasser (fx SF₆) og beslægtede forbindelser fås værdier op til 23.900.

Med den store spredning i GWP kan enkelte stoffer få en målelig virkning, selvom de optræder i forsvindende koncentrationer.

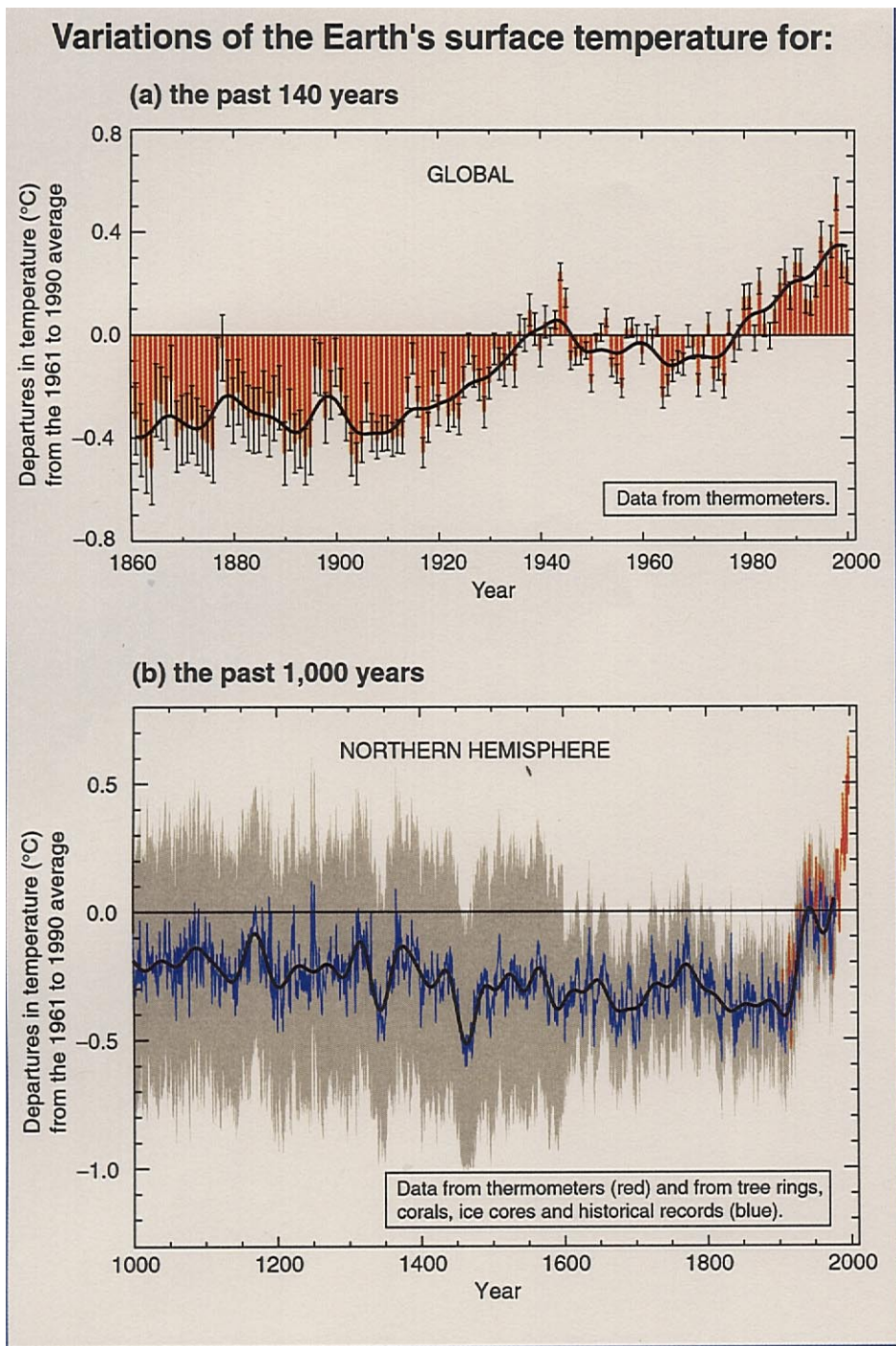
Jorden modtager gennem solstrålingen i gennemsnit 342 W/m², der ved ligevægt skal returneres som stråling til verdensrummet. Påvirkninger af denne energibalance kaldes "thermal forcing" og udtrykkes ligeledes i W/m². *Figur 2.6.2* viser globale middelværdier af påvirkningerne på grund af ændringer i koncentrationer af drivhusgasser og aerosoler fra før industrialiseringen til nu samt virkningen af ændringer i solens udstråling siden 1850, således som de er opgjort af IPCC (2001). Højden af blokkene angiver anslåede gennemsnitsværdier, mens bjælkerne viser usikkerheden på gennemsnitsværdierne. Det at den direkte positive påvirkning fra CO₂, CH₄, N₂O og halocarboner der dominerer. Nedbrydningen af ozon i stratosfæren giver et negativt, men usikkert bidrag, og væksten af ozonkoncentrationen i den nederste del af atmosfæren et tilsvarende positivt. Bidrag fra forskellige typer af partikler er meget usikre. Virkningen fra ændringer i arealanvendelse formodes at være negativ, og ændringer i solstrålingen at være positiv, men også disse bidrag er dårligt forstået. Samlet er der kun tale om få procent af den naturlige påvirkning, men alligevel kan det få afgørende betydning for Jordens klima. Kortvarige påvirkninger fra fx vulkanudbrud, der medfører udsendelse af partikler med en afkølede virkning, er ikke medtaget.



Figur 2.6.2. De globale klimapåvirkninger som årlige middelværdier fra 1750 til nu. Klodserne angiver middelværdier og de lodrette linier det anslåede usikkerhedsinterval. Endvidere er angivet den videnskabelige forståelse af de underliggende mekanismer, der kan være høj (H), middel (M), lav (L) eller meget lav (ML). De enkelte bidrag har forskellig natur. Det skal derfor understreges, at man ikke uden videre kan addere de forskellige bidrag og på den måde få et nettoresultat. (Efter IPCC, 2001).

Klimaændringer indtil nu

Temperaturmålinger har været foretaget siden 16-1700 tallet, men først efter ca. 1860 er der systematiske og pålidelige målinger, som dækker hele Jorden. Hvis man skal vurdere om klimaet har ændret sig, er det dog et problem at mange stationer, der oprindeligt var placeret i landlige omgivelser, nu ligger i byområder, hvor temperaturen kan være et par grader højere. Marine temperaturmålinger er ligeledes udsat for ændringer i målebetingelserne i form af større og hurtigere skibe. Tidligere målt vandtemperaturen i en pøs der blev halet op på dækket, mens moderne målinger foregår i kølevandsindtaget. Efter passende korrektion for disse menneskeskabte effekter finder man en udvikling i den globale middeltemperatur, som vist i figur 2.6.3. Temperaturen er steget signifikant i to perioder: fra 1920-40 og igen siden midt i 1970'erne; 1998 blev det varmeste år i perioden. Opvarmningen har ikke været jævnt fordelt over kloden, og nogle områder omkring Nordatlanten har endog oplevet afkøling. Det er ikke muligt at forklare alle variationerne fra år til år. Dog tilskrives en kortvarig afkøling i 1992 og 1993 virkningerne af vulkanen Mt. Pinatubo's udbrud i 1991.

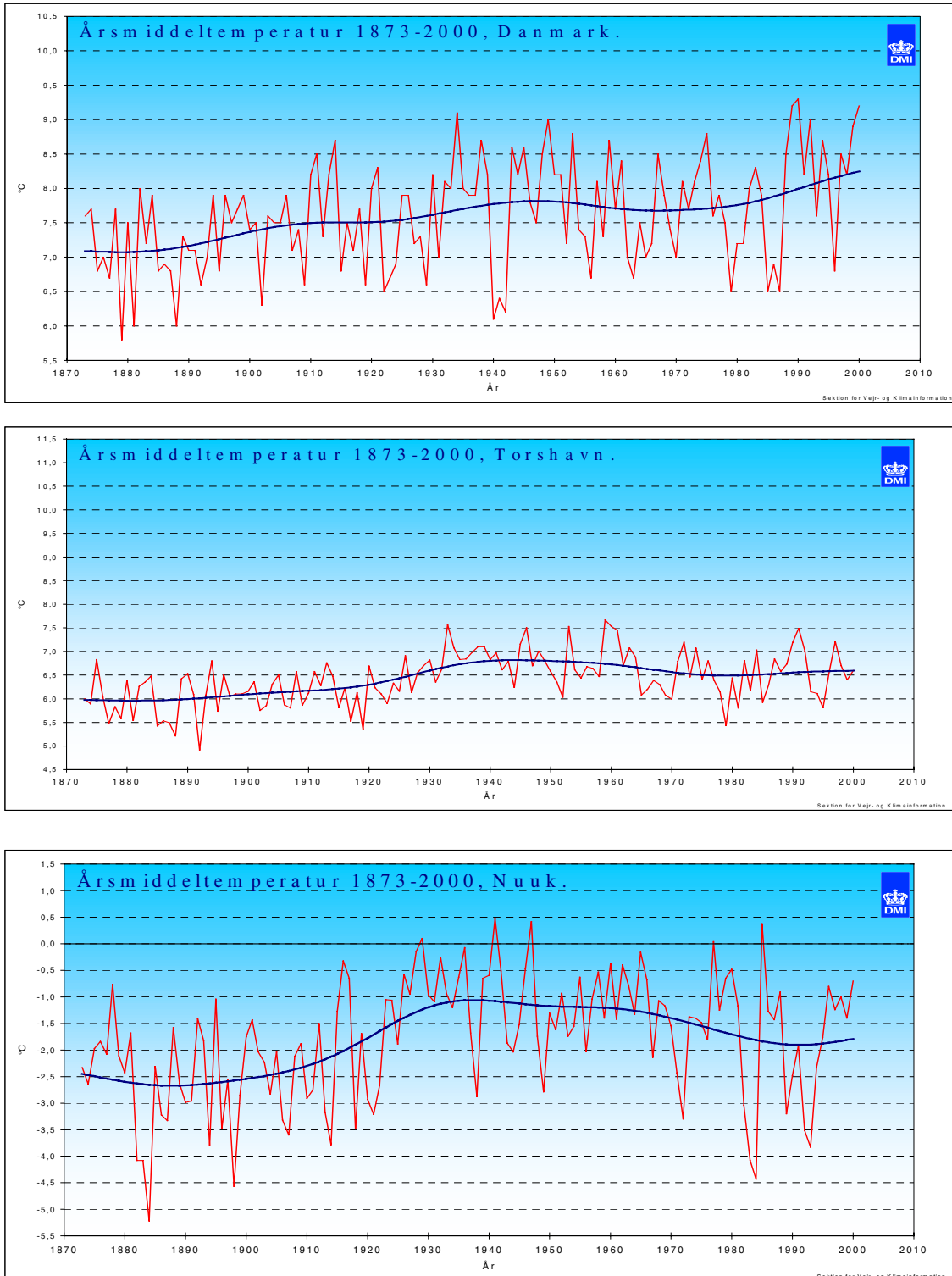


Figur 2.6.3. Den globale middeltemperatur 1860 - 2000, udtrykt som afvigelsen fra gennemsnittet for perioden 1961-90. Der er angivet årsmiddelværdier og værdier filteret med en matematisk teknik, der tilnærmet giver løbende 10-årsmiddelværdier. (Kilde: Hadley Centre for Climate Prediction and Research).

Klimaet i bredeste betydning er afgørende for naturen og for en række menneskelige aktiviteter. Gennem det 20. århundrede har man set en global temperaturstigning på $0,6^{\circ}\text{C}$ med tilhørende miljøændringer, enten positive eller negative, i form af afsmeltning af is, forskydninger af plantevækst og dyreliv mm. Flere af disse forandringer kan tilskrives menneskelig påvirkninger af klimaet og de må formodes at blive forstærket i fremtiden.

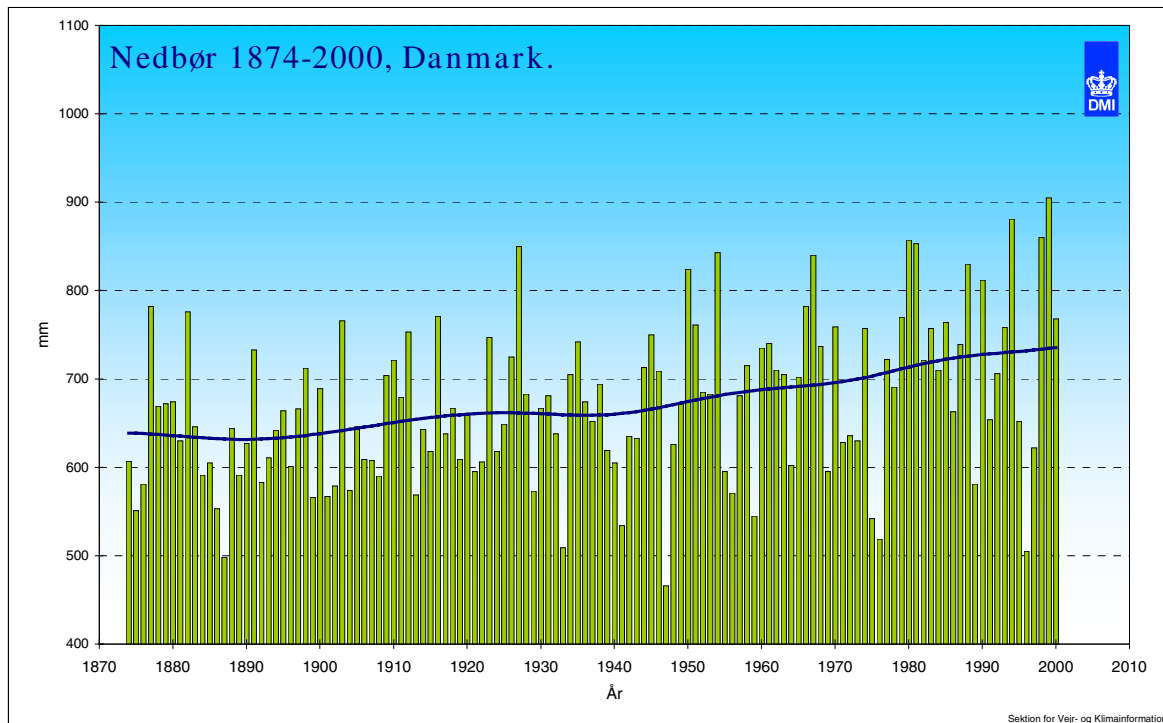
Figur 2.6.4. viser temperaturmålinger fra Danmark, Færøerne og Grønland. Her er temperaturen steget mellem $0,3$ og $0,6^{\circ}\text{C}$ siden slutningen af det 19de århundrede, men der er store variationer fra år til år. Man bemærker specielt, at temperaturen faldt mellem 1950 og 1970.

I Nuuk viser temperaturen en faldende tendens også i de seneste år. For Tórshavn på Færøerne er de årlige variationer i temperaturen mindre på grund af havets varmekapacitet, der virker dæmpende.



Figur 2.6.4. Temperaturudviklingen for Danmark, i Torshavn og i Nuuk siden 1873. Der er vist udglattede årsmiddelværdier. De enkelte år kan afvige mere end 1°C (Kilde: Danmarks Meteorologiske Institut).

Globalt set er udviklingen i nedbør dårligt kortlagt på grund af mangel på observationer over oceanerne og vanskeligheder med at måle nøjagtigt over land. Den observerede nedbør er steget fra århundredskiftet og indtil omkring 1960; siden 1980 er den igen aftaget. I Danmark er den observerede nedbør, som det fremgår af figur 2.6.5, steget ca. 10 % siden slutningen af 1800-tallet. Udviklingen i årssummer kan dog dække over forskydninger indenfor året. 1999 var det hidtil vådeste år i Danmark.



Figur 2.6.5. Observeret årlig nedbør i Danmark siden 1874. Der er store variationer fra år til år, men den udglattede kurve, som svarer til et 30-års glidende gennemsnit, viser en generel tendens i retning af mere nedbør. (Kilde: Danmarks Meteorologiske Institut)

Stigning i vandstand

Som en konsekvens af den globale temperaturstigning er den globale vandstand steget, dels på grund af vandets varmeudvidelse, dels på grund af afsmeltning af gletschere og iskapper. På basis af vandstandsmålinger vurderer IPCC (1996a), at vandstanden er steget mellem 10 og 25 cm de seneste 100 år. Det relativt store usikkerhedsinterval skyldes ændringer på grund af landets vertikale bevægelser, der skal filtreres væk fra målingerne.

Vandstanden i de danske farvande er generelt steget de sidste 100 år og især de seneste 30 år. Da Danmark vipper, sker den største relative stigning i den sydlige del af landet med omkring 1 mm per år.

Fremtidens klima

I den tredje hovedrapport fra The Intergovernmental Panel of Climate Change (IPCC, 2001) er det konkluderet at omkring halvdelen af den observerede temperaturstigning sandsynligvis skyldes menneskelig påvirkning, og der er fremlagt en forstærket argumentation for at den menneskeskabte forøgelse af drivhuseffekten uundgåeligt vil medføre et vist mål af klimaændringer. Hvor store ændringerne vil blive, hvor hurtigt de vil forløbe, og hvordan de vil blive fordelt på Jorden er endnu usikkert - og det vil i alle tilfælde afhænge af, i hvilket omfang det lykkes at få begrænset det globale udslip af drivhusgasser.

Generelt forventes det at blive varmere, men med store regionale forskelle. De største ændringer vil ske på høje breddegrader. Samtidigt forventes ændringer i nedbørsforholdene. Da varmere luft kan indeholde mere vanddamp, vil den samlede globale nedbør antagelig forøges. Nedbørens fordeling henover året er her af større betydning end de absolutte mængder. Flere modeller peger på en større hyppighed af tørre somre og vådere vintre. Dertil kommer en forventet, og til dels observeret, stigning i antallet af kraftige nedbørhændelser.

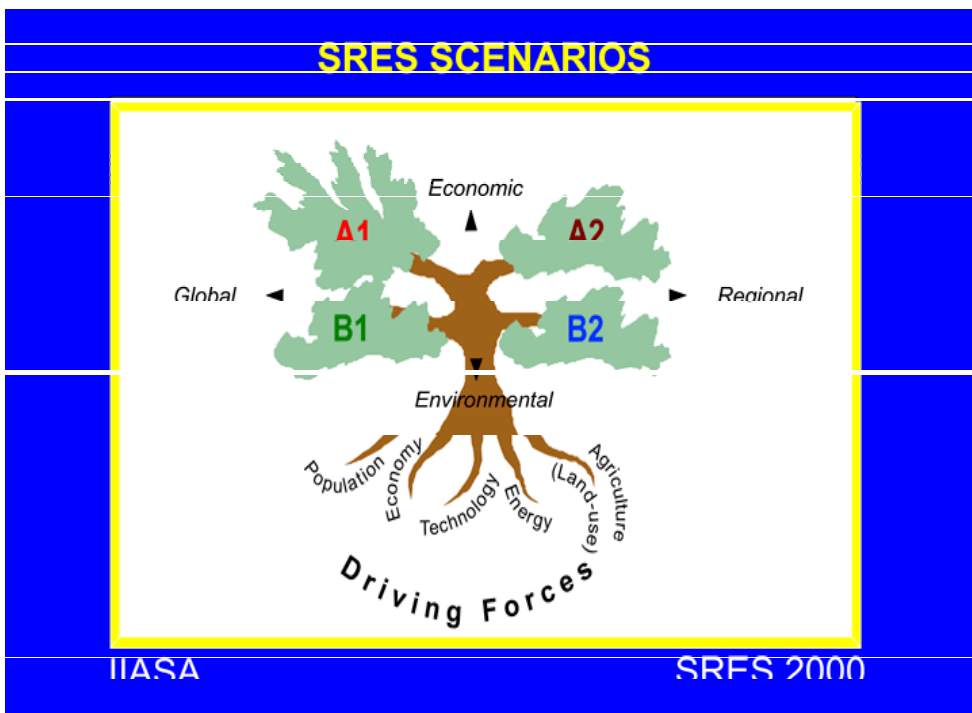
En fortsat global opvarmning vil ledsages af en stigning i havenes vandstand. Også her vil der blive tale om regionale forskelle på grund af ændringer i vindsystemerne. I praksis er det den lokale, relative vandstand og risiko for ekstreme værdier, der har betydning for virkningerne af en global vandstandsstigning.;

Emissionsscenarier

Når vi bevæger os fra observationer i fortiden til scenarier for fremtiden bliver konklusionerne mere hypotetiske og må baseres på komplicerede modelberegninger. Hvor store ændringerne vil blive, hvor hurtigt de vil forløbe, og hvordan de vil blive fordelt på Jorden er endnu usikkert - og det vil i alle tilfælde afhænge af, i hvilket omfang det lykkes at få begrænset det globale udslip af drivhusgasser.

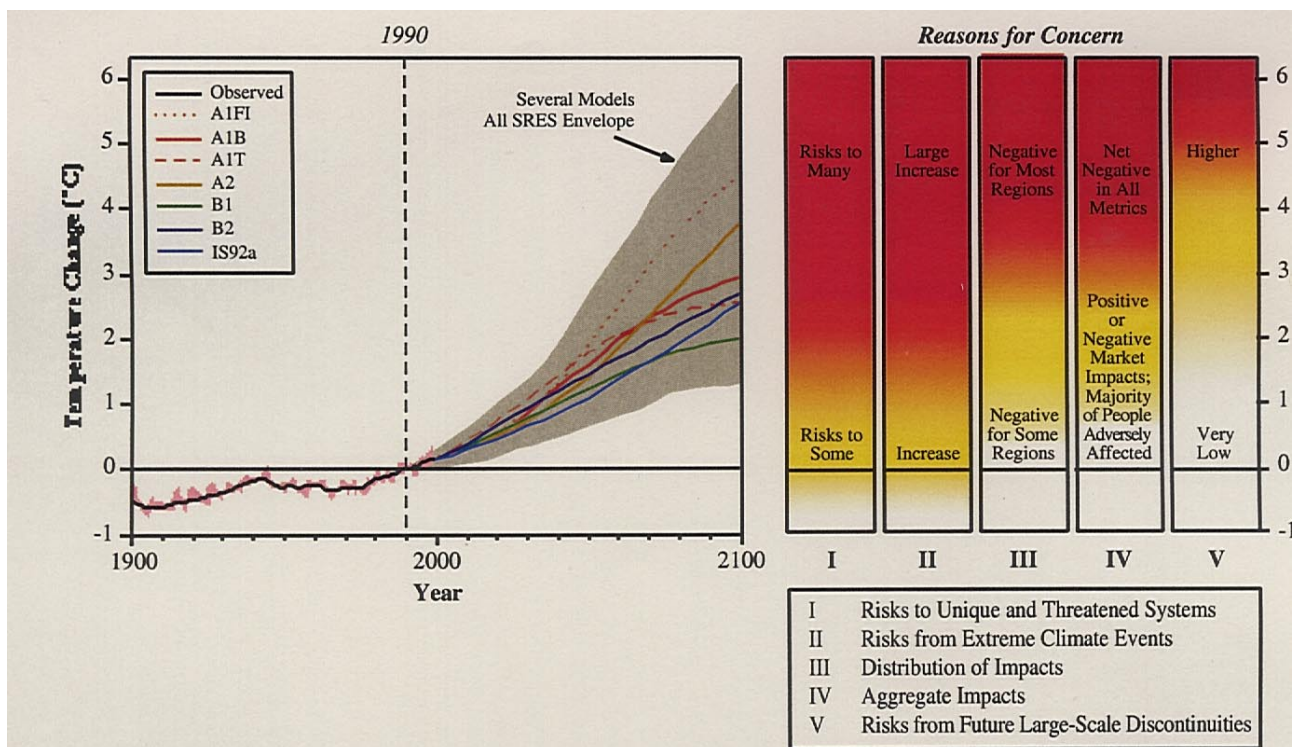
I forbindelse med udarbejdelsen af den seneste IPCC-vurdering (2001) er der derfor opstillet en række scenarier for udviklingen i Verden frem til år 2100. De er opdelt i fire familier af "historier" alt efter om hovedvægten lægges på økonomisk eller miljømæssig udvikling, og globalt eller regionalt orienteret udvikling (figur 2.6.6) og beskriver henholdsvis:

- **A1.** En fremtidig verden i meget hurtig økonomisk vækst, med en verdensbefolkning, der kulminerer i midten af århundredet og en hurtig introduktion af nye mere effektive teknologier.
- **A2.** En mere heterogen verden med fortsat stigning i verdensbefolkningen og langsom mere teknologisk udvikling.
- **B1.** En verden der i visse henseender minder om A1, men i højere grad satser på service og informationsbaseret økonomi og bæredygtige teknologier.
- **B2.** En verden der har fortsat befolkningsvækst, men dog mindre end A2 samt langsom mere og mere forskelligartet teknologisk udvikling end A1 og B1.



Figur 2.6.6. IPCC's fire scenariefamilier og deres drivende kræfter. (Efter IPCC, 2001)

Tilsammen dækker scenarierne forskellige kombinationer af vækst i verdensbefolkning (ca. 7 - 15 milliarder), vækst i globalt bruttonationalprodukt (ca. 11 - 26 gange), fordeling af energiproduktion på fossile og ikke fossile energikilder mm. Selvom nogle få urealistisk optimistiske scenarier indebærer et fald i *udslippet* af CO₂, indebærer alle en stigning i *koncentrationen* spændende fra det nuværende 370 ppm til fra ca. 500 til 1000 ppm frem mod år 2100.



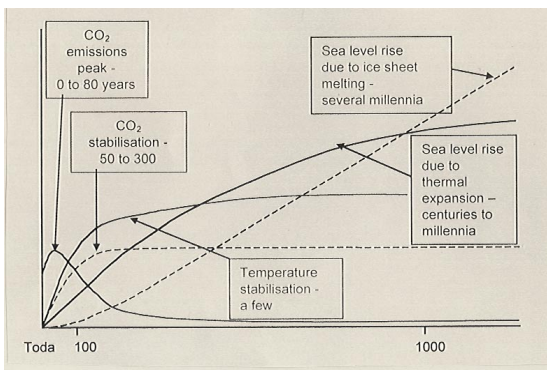
Figur 2.6.7. Fremskrevne temperaturstigninger i IPCC's scenarier. I søjlerne til højre er vist mulige effekter. Det fremgår klart, at risikoen vokser med temperaturen. (Efter IPCC, 2001).

Globale klimascenarier

De tilsvarende stigninger i global middeltemperatur beregnes til 1,4 – 5,8°C frem mod 2100 som globalt gennemsnit, men med store regionale forskelle. Der beregnes generelt forøget nedbør om vinteren og reduktion om sommeren uden for troperne. Specielt kan subtropiske områder blive ramt af reduceret nedbør. Endvidere vil nedbørens fordeling på årstider ændres. Endelig vil mere nedbør falde som regn og mindre som sne, hvorved afstrømningen – og dermed udnyttelsen – af vandet ændres. Helt specielle forhold gør sig derfor gældende i områder, hvor en del af vandressourcerne kommer fra sommerafsmeltning af gletsjere. Figur 2.6.7 viser spændet i fremskrivningerne af globale middeltemperaturer og de mulige deraf følgende miljøeffekter.

Hvis det lykkes at få stabiliseret koncentrationen af CO₂ og andre drivhusgasser vil klimaet formentlig finde en ny ligevægt i løbet af et par hundrede år. Anderledes stiller det sig imidlertid med vandstandsstigningerne. De forskellige scenarier giver globale middelværdier mellem 9 og 88 cm frem mod år 2100, men på grund af en langsom gletsjerafsmeltning - og i særdeleshed en meget langsom opvarmning af oceanerne - vil vandstanden fortsætte med at stige i flere hundrede år efter at jordens opvarmning er begyndt.

Selvom en fuldstændig afbødning af klimaændringer således ikke kan undgås, vil enhver opbremsning lette en tilpasning. Figur 2.6.8 viser et muligt forløb, der går i klimaligevægt efter et par hundrede år.



Figur 2.6.8. Tidshorisonter i drivhusproblematikken. Figuren er rent kvalitativ, men kunne fx vise en stabilisering på det dobbelte af det nuværende CO₂-niveau og en global temperaturstigning på ca. 4°C. Den endelige vandstandsstigning kunne blive flere meter.

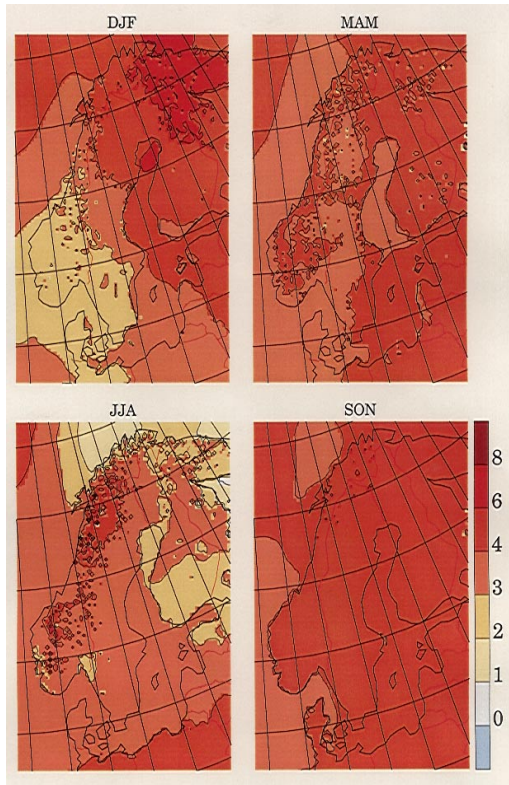
Det har i forskellige sammenhænge været diskuteret om en forøgelse af drivhuseffekten kunne udløse større, hurtige klimaændringer, fx gennem en ændring af de store havstrømme. Umiddelbart er det ikke sandsynligt, og de fleste klimaberegninger viser, at der næppe bliver tale om mere end en afsvækkelse af fx den Nordatlantiske strøm. Det kan betyde at Nordeuropa ikke oplever en så kraftig drivhusopvarmning som ellers. På grund af klimamodellernes fortsat manglende evne til at reproducere allerede observerede ændringer i klimaet, kan det ikke udelukkes, at dybvandsdannelsen i de Nordiske have vil blive påvirket i hidtil uset grad.

Et scenario for Danmark

Når man skal vurdere virkningerne af menneskeskabte klimaændringer i Danmark er udgangspunktet usikkert. Først og fremmest fordi der er mange muligheder for, hvordan verden vil udvikle sig. Man er derfor først nødt til at gøre nogle antagelser (et såkaldt emissionsscenario), som er realistiske, men som man dog ikke har sikkerhed for vil blive realiseret. Hertil kommer imidlertid at klimamodellerne stadig har en række usikkerhedsmomenter, og specielt er deres opløsningsevne på grænsen af hvad der er nødvendigt, hvis man skal se på mindre områder som fx Danmark.

Globale modelberegninger har kun en opløsningsevne på 300-500 km, men den kan forbedres ved kørsel af modeller med høj opløsning for et mindre område, hvor randbetingelserne dog fortsat

styres af de globale modelresultater. Beregninger af denne type er foretaget for Skandinavien af flere Nordiske klimacentre. I en kørsel har forskerne anvendt IPCC's emissionsscenario IS92a, der giver en global opvarmning på ca. 4°C frem mod 2100 (Christensen 2000), og sammenligner klimaet omkring 1990 med klimaet omkring 2075 – man ser altså på udviklingen over små 100 år (figur 2.6.9). Der findes en generel opvarmning på omkring 4°C, der er størst i nordlige områder, om vinteren og om natten. Det betyder at døgn- og årstidsvariationer generelt bliver mindre.



Figur 2.6.9. Forskel i beregnet middeltemperatur i Skandinavien. Farverne angiver for hver sæson forskellen mellem klimaet i dag og det modellerede klima omkring år 2075.

Som nævnt ovenfor er større, umiddelbare ændringer i de store havstrømme ikke sandsynlige. DMI's modelberegninger viser en svækkelse i løbet af de næste hundrede år efterfulgt af en regenerering. Det vil antagelig ikke give en netto afkøling af Danmark, men kun en opbremsning af opvarmningen.

En analyse af den simulerede nedbør viser tendens til et vådere klima med hyppigere forekomst af kraftig nedbør. For Danmark beregnes en stigning i nedbør på 5-10% med den største vækst om vinteren og mulighed for et svagt fald om sommeren. Alt i alt vil det ikke regne hyppigere, men når det regner vil det regne kraftigere. For Danmark beregnes det således at den nedbørmængde, der falder i kraftige hændelser med en intensitet på over 15 mm/dag stiger med ca. 50%.

Der forventes en samlet effekt på afstrømningen til vandløbene, der for Danmark for perioden december - april forventes at stige yderligere ca. 10%. Ændringer i sommerafstrømningen omgærdes fortsat af stor usikkerhed.

Konsekvenser af klimaændringer

Forskydning af jordens vegetation

De forventede klimaændringer svarer meget groft til at Jordens klimazoner forskydes nogle hundrede km mod polerne. I bjergene svarer temperaturstigningen til en tilsvarende forskydning i højden. Umiddelbart lyder disse ændringer ikke af så meget, men over hundrede år svarer det til

mere end vandringshastigheden for mange træarter. Specielt i marginalområder kan nogle økosystemer derfor forsvinde og blive erstattet af andre.

Man kan dog af mange grunde ikke umiddelbart regne med, at et givet område på længere sigt får en vegetation som den, der findes lidt nærmere ækvator. Dels vil døgn- og årsrytmen i solindstråling være uændret, dels er de fleste planter allerede tilpasset det eksisterende variable vejr og klima. Der kan dog ske ændringer i solstrålingen på grund af ændret skydække. Muligvis kan visse plantearter få problemer med korterevarende snedække og en tidligere start på vækstsæsonen, især hvis det tidlige forår lokker blomster og knopper frem før risikoen for frost er ovre. Generelt forventes kulturlandskaberne i de rige lande i den tempererede zone at være mest robust overfor klimaforandringer. Ligeledes forventes de naturlige økosystemer i den maritime del af den tempererede zone at være mindst udsat for skadelige påvirkninger.

Jordfugtighed

Når man skal vurdere klimaændringers betydning for vegetation, er temperaturstigningen ikke nødvendigvis den afgørende faktor. Et samspil mellem vegetation, jordbund, temperatur, vind og nedbør bestemmer via fordampningen den resulterende jordfugtighed. Her har også nedbørsmønstret betydning; kraftige enkelt-byger er mindre fordelagtige end jævn regn, og for landbrugsafgrøder skal nedbøren helst falde i vækstsæsonen og ikke under høsten.

Landbrugsproduktion

Et væsentligt aspekt ved klimaændringer er deres indflydelse på landbrugsproduktionen og dermed på fødemidlerne til den voksende verdensbefolkning. IPCC vurderer, at det globale potentiale næppe ændres væsentligt, men der vil kunne ske væsentlige forskydninger, som kan medføre internationale konflikter.

Danmark synes umiddelbart at være gunstigt stillet, fordi det ligger pænt inde i det tempererede skovområde. Man forventer derfor ikke drastiske ændringer, men klimaændringerne som sådan kan give mulighed for andre – nu sydligere – afgrøder, og i kombination med den stigende koncentration af CO₂, der fremmer væksten for visse planter, vil udbyttepotentialet forøges (Olesen, 2001). Ændringer i landbrugsaktiviteter kan ske med kort varsel. [Antagelig vil den nuværende tendens med aftagende kvæghold og vækst i produktionen af svin og korn forstærkes.]

En forøget svineproduktion vil imidlertid føre til og kræve mere gødning, der sammen med øget nedbør og højere jordtemperatur om vinteren forøger risikoen for nitratudvaskning. Udvaskningen kan yderligere forstærke problemet med iltsvind i de indre danske farvande som følge af en tendens til kraftigere afstrømningsbetinget lagdeling af vandsøjlen i sommerhalvåret

Højere temperaturer kan forøge risikoen for skadedyr (fx Coloradobiller) og plantesygdomme og dermed umiddelbart kræve større forbrug af pesticider. Her kan det blive nødvendigt med ændring i miljølovgivningen for på en gang at sikre et omkostningseffektivt landbrug og en beskyttelse af vandressourcer under et ændret fremtidigt klima.

Skove og skovbrug

Til trods for omfattende skovrydninger i Udviklingslandene synes Jordens terrestriske økosystemer for tiden at udgøre et dræn for CO₂. Dette forhold kan dog hurtigt ændres, hvis klimaændringer medfører reduceret skovvækst. Især den nordøstlige del af Sydamerika vil være truet.

Natur og Miljø, 2001, Udkast

Danske skove er i det væsentlige stærkt styrede produktionsskove og opererer med omdriftstider af størrelsesordenen 100 år. De kræver derfor langsigtet planlægning. En omlægning fra den dominerende rødgran til bøg eller måske eg, der trives bedre i varme, vil være hensigtsmæssig.

Påvirkning af vandressourcer

Der er væsentlig usikkerhed om, hvordan klimaændringer kan påvirke vandressourcerne, der primært er bestemt af et samspil mellem på den ene side fordampning og nedbør og på den anden side oplagringskapacitet og forbrug. Nogle områder (bl.a. i Afrika og i lavtliggende kystegne) har allerede alvorlige problemer med mængden og kvaliteten af vand, og de vil antagelig forværres i de kommende årtier. I andre (bjergrige) områder kan forøget nedbør i korterevarende kraftigere hændelser betyde større afstrømning og risiko for oversvømmelser. Risikoen for brud på dæmninger er reel i mange lande allerede i dag og styring af vandressourcerne ser ikke ud til at blive lettere i fremtiden med de forventede ændringer i nedbørsmønstret.

Allerede nu har over 1 milliard mennesker ikke adgang til vand af tilstrækkelig kvalitet. Dette problem forventes at vokse. Dog næppe så meget på grund af klimaændringerne i sig selv, der kan medføre øget nedbør. Snarere som følge af et øget behov i en varmere verden og fra en større befolkning.

Der er ikke gennemført systematiske beregninger over hvorledes fremtidige klimaændringer vil påvirke grundvandsdannelsen i *Danmark*, men den kan være følsom overfor klimavariationer, og dette bør tages i betragtning ved dimensionering af vandforsyningsanlæg.

Mængden af vandressourcer påvirkes af såvel tilgængeligheden af vand fra naturens side og forbruget af vand til forskellige formål. Med udsigten til somre, som kan blive både varmere og mere tørre, kan der forventes at komme en øget dansk efterspørgsel efter vand til flere formål. For det første vil husholdningsforbruget øges på grund af havevanding, med mindre der indføres restriktioner herimod. For det andet vil landbrugets behov for markvanding stige markant. Allerede i dag er der flere steder i landet et stort ønske fra landbrugets side om tilladelser til øget markvanding. Fordi kunstvanding har stor indflydelse på sommervandføringen, vil der fortsat være problemer med at overholde vandløbsmålsætningerne. Problemerne i dag i form af interessekonflikter mellem landbrug og miljø kan forventes at stige i takt med at behovet for kunstvanding stiger. For det tredje vil naturens behov for vand til opretholdelse af bl.a. vådområder blive påvirket. Det er vanskeligt at sige, hvorledes vandbalancen i vådområder udvikler sig, fordi den påvirkes af mange faktorer, og fordi de enkelte vådområdelokaliteter kan forventes at opføre sig forskelligt afhængig af bl.a. lokale geologiske forhold.

Salt i grundvandet

En stigende vandstand kan i kystnære områder betyde at saltvand trænger ind i grundvandet. Herved forringes kvaliteten.

I Danmark produceres stort set alt ferskvand i drikkevandskvalitet og fra grundvand. Salt (NaCl) i vandet skyldes normalt aflejringer i undergrunden. Kun i få områder som mindre øer (fx Langeland og Samsø) og nær lavtliggende kyster (fx ved Køge Bugt) spiller indtrængning af havvand en rolle. Med et stigende havniveau vil saltvandsindtrængning blive forstærket og kan forventes at blive begrænsende for vandindvinding flere steder end tilfældet er i dag.

Kystbeskyttelse

Den stigende vandstand vil for en række kystområder og mindre øer verden over blive et alvorligt problem. Uden ekstra beskyttelse vil en ikke usandsynlig stigning på 40 cm. betyde at antallet af personer der årligt rammes af oversvømmelse stiger fra godt 30 millioner til næsten en kvart milliard.

Den danske kystlinie har ændret udseende siden sidste istid for 10.000 år siden som følge af relative havspejlsændringer. Kystlinien er relativt lang – 7400 km i forhold til arealet på 42.000 km². I Danmark bor 80% af befolkningen i byområder med tilknytning til kysterne. De sårbare områder udgøres i det væsentlige af hævet havbund, marskområder og inddæmmede arealer, hvor der i alt ligger 60-80.000 ejendomme. Disse ejendomme trues dog ikke alle af den forventede globale vandstandsstigning (i størrelsesordenen 33-46 cm i løbet af de næste 100 år) Den største trussel mod liv og ejendom forventes i den sydvestlige del af Danmark, hvor ændringer i stormretning, hyppighed og varighed kan bidrage til at forøge problemets omfang.

Omkring 1100 km af kystlinien er beskyttet af diger og 700 km med fast opbygning. Bløde løsninger – i særdeleshed kystfodring – anvendes i stigende omfang.

Indtil nu har en direkte planlægning efter en vandstandsstigning udover de nuværende sekulære bevægelser været af yderst beskedent omfang. Det samme gælder kystnære infrastrukturer, hvor den uofficielle holdning har været "vent og se!" (Fenger m.fl. 2001)

Et vigtigt aspekt er virkningerne på kystnære økosystemer, i særdeleshed marine forlande, saltvandsmarsk og klitter. Her står man over for et valg mellem en beskyttelse af arealet på bekostning af de naturlige økosystemer og en naturlig kystudvikling på bekostning af areal. Den hidtidige strategi har været at beskytte naturen – dels fordi mange kystområder er af speciel karakter og fx ynglested for vadefugle (*figur 2.6.10*) – dels fordi man i forvejen opgiver eller braklægger marginale arealer.

Figur 2.6.10. En interessant mulighed er dannelse af kunstige saltvandslaguner, hvorved man kan kompensere for tab af vådområder til vadefugle efter kystbeskyttelse. Her Margrethe Kog i sydvest Danmark.
(foto: Lars Maltha Rasmussen, DMU).