

NILU OR: 23/89

NILU OR : 23/89
REFERANSE: O-1336
DATO : APRIL 1989
ISBN : 82-425-0028-2

CO₂ OG KLIMA

S. Knudsen

SAMMENDRAG

CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren har økt med snaut 25% fra den industrielle revolusjonen startet og fram til i dag. Det er samtidig registrert en temperaturstigning på den nordlige halvkule på ca. 0,5⁰C. Denne temperaturstigningen har ikke foregått overalt. Temperaturen i Nord-Europa har f.eks. sunket med ~0,5⁰C de siste 30 år.

Jordens klima styres av et meget innviklet system der mange faktorer spiller inn. Det anses sannsynlig i dag at en dobling av CO₂-innholdet i atmosfæren kan føre til en temperaturøkning på 1,5-4,5⁰C. Dette er ingen ubetydelig endring i temperaturen. Til sammenligning var middeltemperaturen under siste istid bare 5 grader lavere enn den er i dag.

Forskerne er i dag enige om at prognosene for temperaturøkningen er sannsynlige på global skala. Det gjenstår mye før mekanismene som styrer jordens klima er fullt ut forstått, slik at de regionale prognosene for klima kan sies å være gode. Skal klimaet på jorden kunne beskrives på en tilfredsstillende måte, må dette modelleres matematisk. Dette krever en god forståelse av bevegelsene i atmosfæren og i havene, biologiske prosesser, karbonsyklusen, fordelingen av skydekket og strålingsbalansen på jorden.

Utslippene av CO₂ i Norge er i dag 33 Mt/a. Dette utgjør ca. 2⁰/100 av verdens totale utslipp. Et gasskraftverk på 200 MWe vil slippe ut ca. 0,6 Mt/a. Dette utgjør ca. 7% av den industrielle forbrenning av fossile brensler i Norge i dag.

INNHold

	Side
SAMMENDRAG	1
1 INNLEDNING	3
2 ATMOSFÆRENS DRIVHUSGASSER	3
3 REGISTRERING AV CO ₂ -INNHALDET I ATMOSFÆREN	6
4 CO ₂ -SYKLUS	8
5 KONSEKVENSER AV ØKNINGEN AV DRIVHUSGASSER I ATMOSFÆREN	10
6 ANDRE PÅVIRKNINGER ENN ENERGIFORBRUKET	13
7 VIKTIGE FORSKNINGSMÅL I FREMTIDEN	14
8 UTSLIPP AV CO ₂ FRA ET 200 MWe GASSKRAFTVERK SETT I RELASJON TIL CO ₂ -PROBLEMATIKKEN	15
9 LITTERATUROVERSIKT	16
VEDLEGG A: Strålingsbalanse	19

CO₂ OG KLIMA

1 INNLEDNING

Siden den industrielle revolusjonen har CO₂-innholdet i atmosfæren økt med snaut 25%. Økningen skyldes bruk av fossilt brensel. Jordas middeltemperatur har økt med ca. 0,5⁰C i løpet av de siste 100 år. Dette tallet baserer seg på målinger utført på land og over havområdene (Jones et al., 1986; Jones et al., 1986b).

Det er uenighet om økningen i global middeltemperatur hittil kan tilskrives drivhuseffekten, eller om temperaturendringen ligger innenfor den naturlige variabiliteten i atmosfæren (Hansen et al., 1988).

Denne rapporten tar sikte på å gi en kort innføring i CO₂-problematikken, hvor forskningen står og hvor de største usikkerhetene finnes.

En kort, sammenfattende beskrivelse av jordas strålingsbalanse er gitt i vedlegg A.

2 ATMOSFÆRENS DRIVHUSGASSER

Selv om atmosfæren for det meste inneholder oksygen og nitrogen, er det mange andre gasser som er til stede i små mengder. En av disse er karbondioksid (CO₂). Konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren er i dag ca. 344 ppmv ("parts per million" regnet ut fra volum). Det er imidlertid også andre gasser som bidrar til drivhuseffekten.

Tabell 1 viser atmosfærens sammensetningen av forskjellige gasser, og en antatt årlig økning av konsentrasjonene for gassene som bidrar til drivhuseffekten.

Tabell 1: Atmosfærens sammensetning.

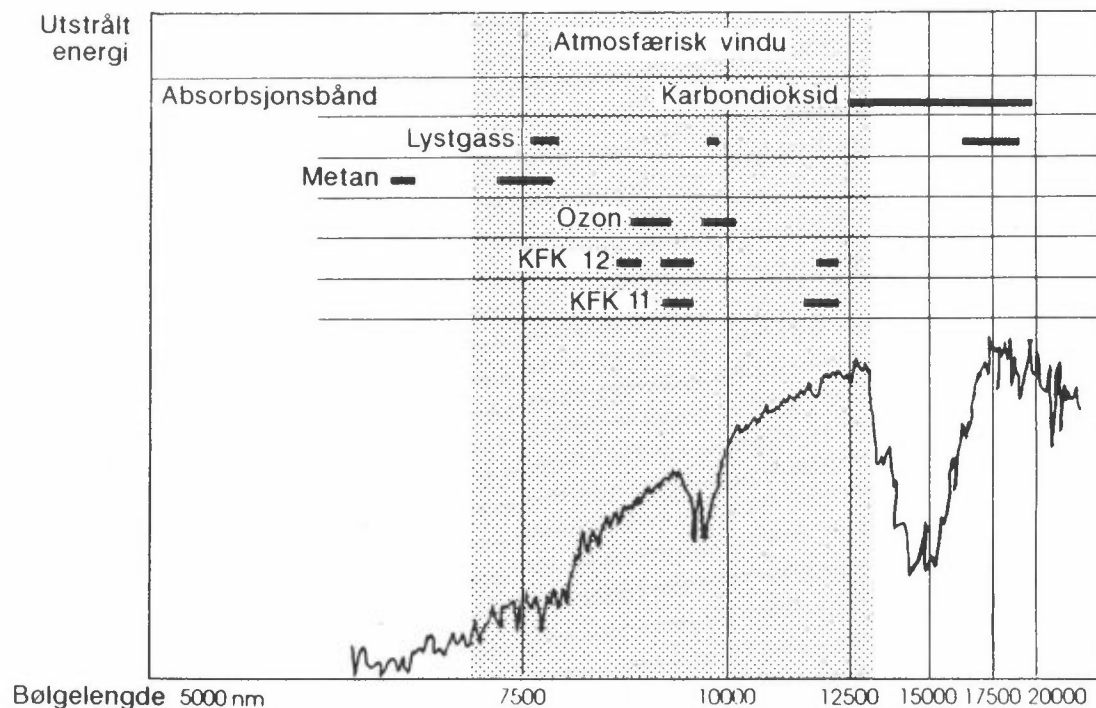
	Konsentrasjon i atmosfæren i %	Årlig økning %
Nitrogen	75,5	
Oksygen	23,14	
Argon	1,28	
Vanndamp	0,04	
Karbondioksid	$34\ 400 \times 10^{-7}$	0,4
Metan	$1\ 650 \times 10^{-7}$	1,0
Dinitrogenoksid (lystgass)	304×10^{-7}	0,25
Ozon	$20-50^* \times 10^{-7}$	1,0
KFK 11**	$0,23 \times 10^{-7}$	5,0
KFK 12**	$0,40 \times 10^{-7}$	5,0
Karbondetraklorid	$0,125 \times 10^{-7}$	1,0
Karbonmonoksid	Variabel	0-2
Metylkloroform	$0,13 \times 10^{-7}$	7,0

* I troposfæren; økningen skjer bare over den nordlige halvkule.

** Klorfluorkarboner (freon).

Økningen i konsentrasjonen av drivhusgasser henger nøye sammen med økningen i jordens befolkning.

Atmosfæren inneholder også store mengder vanndamp, som spiller en viktig rolle i absorpsjonen av langbølget stråling. Ca. 90% av atmosfærisk absorpsjon skyldes vanndamp, skyer og karbondioksid. De resterende 10% skyldes ozon, metan og lystgass. Figur 1 viser i hvilke bølglengdeintervaller de forskjellige drivhusgassene absorberer jordens infrarøde stråling. Mange av absorpsjonsbåndene for de forskjellige drivhusgassene ligger i "det atmosfæriske vindu", dvs. den del av spekteret som ligger mellom 7 000 og 13 000 nm. I dette "vindu" er det lite annet som hindrer stråling fra jorden i å slippe ut i verdensrommet.



Figur 1: Bølgelengder der drivhusgassene absorberer utgående langbølget stråling (UNEP, 1987).

— absorpsjonsbånd.

~ utgående langbølget stråling målt utenfor atmosfæren.

Kildene til disse forskjellige drivhusgassene er som følger (CO_2 vil bli behandlet i kapittel 4):

- Klorfluorkarboner (KFK) slippes ut i atmosfæren fra industrivirk-
somhet, produkter og fra uønskede lekkasjer. Velkjente eksempler
er produksjon og bruk av isolasjonsmaterialer, skumplast, embal-
lasje, drivmidler i spraybokser og kjøleanlegg. Klorfluorkarboner
er nå regulert gjennom Montreal-protokollen, som sier: Forbruket
av KFK 11, KFK 12, KFK 113, 114 og 115 skal fryses på 1986-nivå
fra 1989, bli redusert i forhold til 1986 med 20% i 1994 og med
50% i 1999. Forbruket av Halon 1211, 1301 og 2402 skal fryses på
1986-nivå.
- Mennesket kontrollerer ca. 50% av dagens atmosfæriske kilder til
metan (CH_4), vesentlig gjennom jordbruk, brenning av trevirke,
naturgassbruk, avfallsfyllinger og kullgruvedrift. Bruk av natur-
gass vil føre til økte utslipp av metan med lekkasjer, ufullstendig
forbrenning etc.

- Økningen i konsentrasjon av lystgass (N_2O) skyldes trolig økt bruk av gjødsel og forbrenning av kull og olje.
- Økningen av ozonmengden i den nedre delen av atmosfæren (troposfæren 0-12 km) skyldes trolig økningen i utslippene av nitrogenoksider. Økningen av metankonsentrasjonen og andre flyktige organiske stoffer bidrar også til økt ozonkonsentrasjon. Ozonmengden i denne delen av atmosfæren må ikke forveksles med "ozonlaget" som ligger høyere oppe, i stratosfæren.

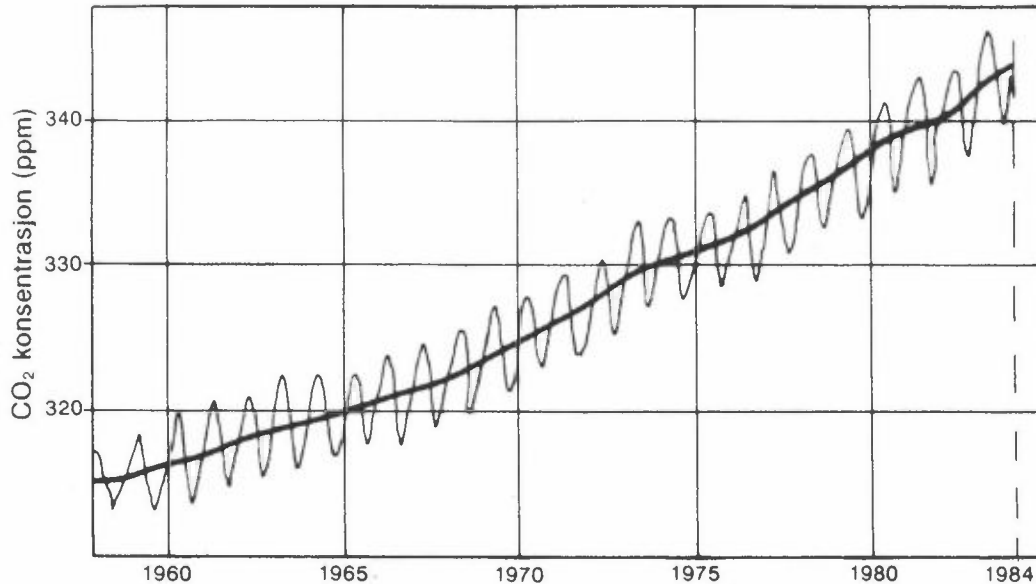
3 REGISTRERING AV CO_2 -INNHALDET I ATMOSFÆREN

Målinger av CO_2 fra Mauna Loa-observatoriet på Hawaii viser en gradvis økning fra 315 ppmv i 1958 til 342 ppmv i 1984. Konsentrasjonen i dag ligger på 344 ppmv.

Analyser av CO_2 i iskjerner fra Antarktis viser at det før-industrielle nivå 270-280 ppmv. Konsentrasjonen av CO_2 øker i dag med ca. 0,4% pr. år.

I tillegg til denne gradvise økningen av CO_2 -konsentrasjonen er det også variasjon med årstid, høyde over havet og breddegrad. Det finnes nå et globalt nettverk, opprettet i 1979, som gjør det mulig å følge fordelingen av CO_2 i atmosfæren nær bakken.

Målingene av CO_2 -konsentrasjonen på Mauna-Loa er gjengitt i figur 2. Dette er den lengste sammenhengende måleserie for CO_2 . Den er også representativ for de store kildene for CO_2 .

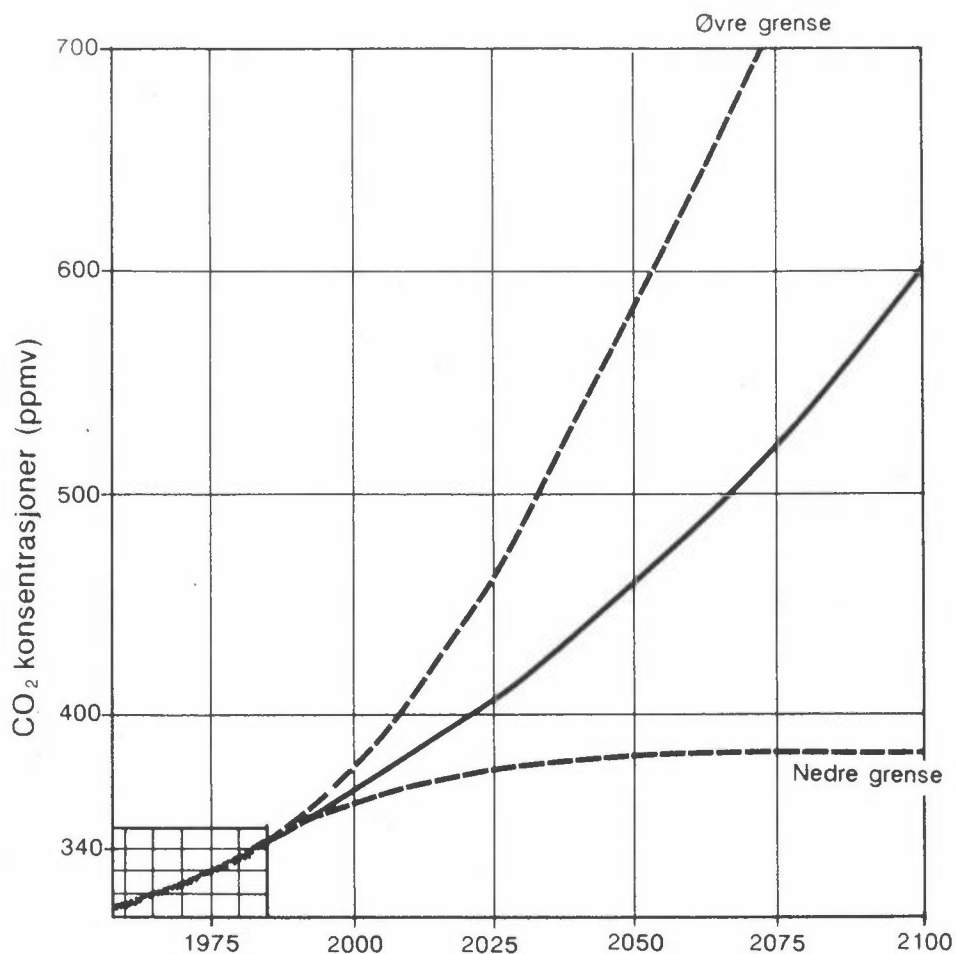


Figur 2: Økningen i atmosfærens innhold av karbondioksid på Hawaii. Målingene er tatt på Mauna Loa (Enting, 1987).

Den videre økning av CO₂-konsentrasjonen i atmosfæren er avhengig av utviklingen i bruken av fossilt brennstoff, avskogningen og fordelingen av CO₂ mellom reservoarene atmosfære, hav og jordskorpen (se kap. 4). Figur 3 gir en oversikt over hvordan CO₂-konsentrasjonen kan komme til å forandre seg med tiden. Kurvene merket nedre grense og øvre grense refererer seg til lavt og høyt energiforbruk. Verdien 550 ppmv refererer seg til en dobling av CO₂ konsentrasjonen fra før-industriell tid. Verdiene er hentet fra Bolin et al. (1986).

Vår begrensede kunnskap om den globale karbonsyklusen, spesielt utvekslingen av CO₂ mellom atmosfæren og havet og atmosfæren og vegetasjon, bidrar til å gjøre slike prognoser usikre (se kapittel 4).

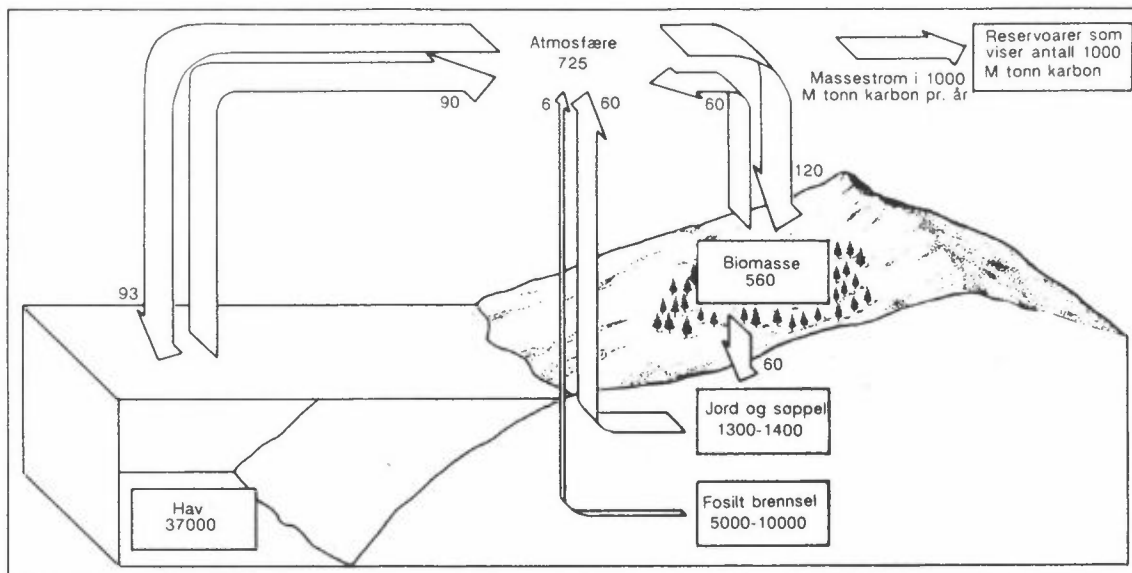
Hvis utslipp av CO₂ som skyldes menneskets aktivitet stoppes helt, vil det ta flere hundre år før konsentrasjonene i atmosfæren kommer tilbake til nivået før den industrielle revolusjon (270-280 ppmv).



Figur 3: Prognose av CO₂-konsentrasjon fram mot år 2100. Nedre grense beskriver utviklingen med lavt energiforbruk, øvre grense med høyt (Bolin et al., 1986).

4 CO₂-SYKLUS

Figur 4 gir en skjematisk oversikt over syklusen til karbon og størrelsen på karbonreservoarene. Det største karbonreservoaret er havene, ca. 37 000 000 Mtonn karbon. Havet mottar mer karbon fra atmosfæren enn det gir fra seg til atmosfæren. Biomassen på land absorberer 120 000 Mtonn karbon pr. år. 60 000 Mtonn karbon av disse beholdes i plantene og 60 000 Mtonn karbon slippes ut til atmosfæren. Utslipp fra jord og søppel tilfører atmosfæren ca. 60 000 Mtonn karbon pr. år. Bruk av fossile brensler tilfører atmosfæren ca. 6 000 Mtonn karbon pr. år.



Figur 4: Den globale karbonsyklus. Det er fire store reservoarer, atmosfæren, havene, jordsmonn og jordens biomasse. Som et resultat av dette vil halvparten av karbondioksidmengden som slippes ut i atmosfæren forbli der, mens resten finner veien til disse reservoarene (UNEP, 1987).

De viktigste kildene til CO_2 i atmosfæren er:

- Forbrenning av fossilt brennstoff.
- Endring av arealbruk (f.eks. avskoging, urbanisering, jordbruk).
- Atmosfærisk oksidasjon av stoff som inneholder karbon. De viktigste er CH_4 (metan), CO , hydrokarboner og delvis halogenerte hydrokarboner. Alle disse forbindelsene ender til slutt opp som CO_2 . Viktige kilder til disse er lekkasjer av fossile brennstoff, avfallsplasser og nedbrytning av organisk materiale.

Effekten av forbrenning av fossile brensler på atmosfærens konsentrasjonsnivå av CO_2 kan beregnes med god sikkerhet bare når karbonsyklusen er forstått. Utslippene av CO_2 fra bruk av fossilt brennstoff bidrar betydelig til den økte konsentrasjonen av CO_2 i atmosfæren. Beregninger og målinger viser at omtrent halvparten av CO_2 som slippes ut i atmosfæren forblir der, mens resten absorberes i havene, planter og dyr.

5 KONSEKVENSER AV ØKNINGEN AV DRIVHUSGASSER I ATMOSFÆREN

Jordens klima er bl.a. avhengig av hvordan konsentrasjonen av karbondioksid og andre drivhusgasser øker i fremtiden. Prognoser for dette krever kunnskap om endring i kildene til disse gassene, og om endring i atmosfærens kjemiske prosesser som en følge av endret kjemisk sammensetning av atmosfæren.

Med kunnskap om hvordan konsentrasjonen av drivhusgassene i atmosfæren sannsynligvis vil forandre seg med tiden, og at vi holder andre faktorer som f.eks. solstråling inn mot jordkloden konstant, er det mulig å forutsi den resulterende forandringen i den infrarøde strålingen fra jordoverflaten. Det er imidlertid vanskelig å oversette dette til en realistisk beskrivelse av det fremtidige klima på jorden.

Med en matematisk modell for jordens klimatiske system, der endringer i infrarød stråling fra jorden og innkommende stråling fra solen beskrives, og der tilbakekoplingsmekanismer er med, kan det være mulig å gi et begrunnet utsagn om fremtidig klima. Viktige tilbakekoplingsmekanismer er f.eks. smelting av snø og is når jordens overflate varmes opp. Dette fører til at mindre sollys vil bli reflektert fra bakken, og temperaturøkningen vil forsterkes. Det vil også berøre skydekket og mengden av vanndamp i atmosfæren. En av de største usikkerhetsmomentene i vurdering av fremtidig klima er i hvilken grad vanndampmengden vil øke, og om dette i stor grad kan dempe drivhuseffekten fra CO₂ isolert sett. Ved en dobling av CO₂-innholdet vil temperaturøkningen sannsynligvis ligge i intervallet 1,5-4,5⁰C.

Disse tallene kan virke små, men de representerer et årlig middel over hele kloden. Til sammenligning var temperaturen ved forrige istid (for ca. 15 000 år siden) antagelig 5⁰C kaldere enn hva den er i dag.

Studier av historiske klimaendringer kan vise hvor store forandringer i klimaet som kan forventes med forskjellige temperaturforandringer. For eksempel for 5 000-7 000 år siden, da temperaturen antagelig var 1⁰C varmere enn nå, var klimaet vesentlig forskjellig fra hva det er i dag. Det falt mer regn i tropene og subtropene (antagelig 50-100% mer

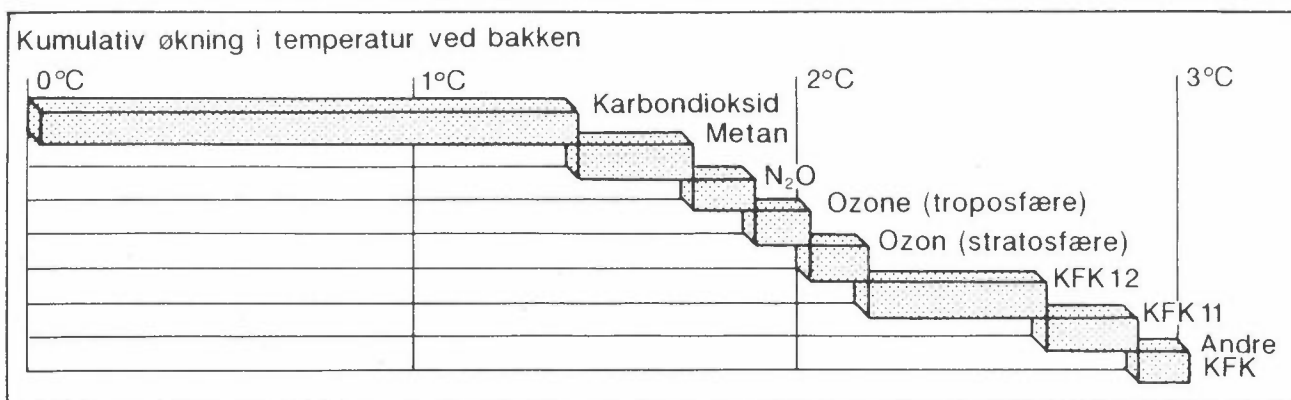
i Afrika og India), og Sahara var antagelig ikke en ørken, men en tørr savanne.

Det er ganske sikkert at temperaturen ikke har forandret seg mer enn 1-2⁰C i løpet av de siste 10 000 år. Dette betyr at temperaturøkningen ved en fordobling av karbondioksid-konsentrasjonen, selv ved det laveste estimatet 1,5⁰C, vil føre til et klimaskifte som er ukjent i jordens nyere historie.

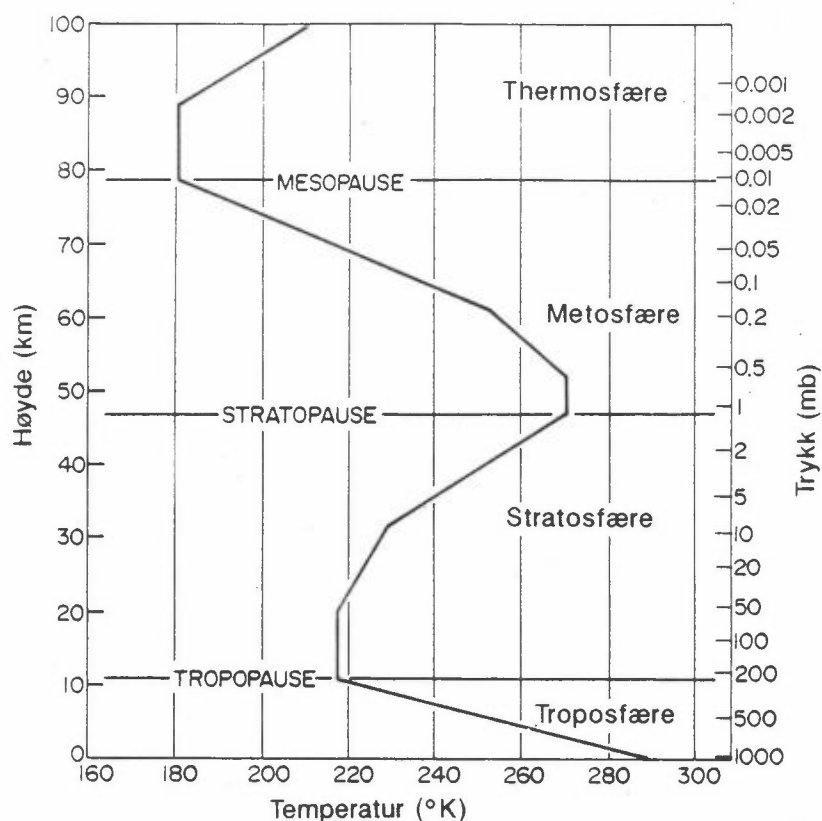
Eksisterende modeller for klimaet og den globale sirkulasjonen i havene og atmosfæren forutsetter gjerne havet som et stillestående medium (ingen havstrømmer). Det er problemer med å ta hensyn til endringer i skydekket, oppvarming av havene (som også fører til at havnivået stiger), og forandringen av sjøisen. Siden disse modellene bare er grove tilnærminger av de mekanismene som styrer klimaet på jorden, kan de ikke gi detaljerte beskrivelser av regionale forskjeller i klimaet. Modellene kan bare gi en indikasjon på hva som kan ventes.

De fleste modellene analyserer hva som vil skje hvis karbondioksid-konsentrasjonen fordobles fra det nåværende nivå på 344 ppmv til rundt 680 ppmv. Det antas at konsentrasjonen vil ha nådd 450 ppmv i år 2030. Det må også tas hensyn til bidraget fra de andre drivhusgassene. Disse kan relativt enkelt regnes ut, gitt prognoser av deres fremtidige konsentrasjoner.

Grovt sagt vil de andre drivhusgassene ha en like stor effekt som CO₂ alene. Dette tilsier at den effekten som blir beregnet for CO₂ vil fordobles av de andre drivhusgassene (se figur 5). Det er altså like viktig å redusere utslippet av disse gassene for å begrense forandringen i klima.



Figur 5a: Kumulativt bidrag til temperaturøkningen fra de forskjellige drivhusgassene i år 2030 (UNEP, 1987).



Figur 5b: Oversikt over lagdelingen og temperaturen av en standard atmosfære.

Flesteparten av disse modellene antyder at jordens midlere temperatur ved bakken vil øke med ca. 4°C. De tre nyeste modellene gir tall som varierer fra 3,5°C til 4,2°C. Oppvarmingen beregnes å bli størst på høye breddegrader i vinterhalvåret på den nordlige halvkule (Dickinson, 1986; Dickinson, 1987; Wilson og Mitchell, 1987a og b; Roehren et al., 1987).

Modellene forutsier generelt at den reflekterte solstrålingen fra jordoverflaten vil avta, og det vil foregå smelting av sjøis. Skydekket vil avta. Nedbøren vil øke.

Disse forandringene vil forekomme senere enn når CO₂-konsentrasjonene er fordoblet. Jorden, og da spesielt havene, varmes opp gradvis. Denne tidsfaktoren er så stor at når CO₂-konsentrasjonen er fordoblet, vil den resulterende temperaturøkningen utgjøre halvparten i 2030. Den andre halvparten kommer etterhvert i løpet av noen tiår til.

Selv om mange usikkerheter gjenstår, er det samstemmighet i den senere tids forskning om at det vil bli en oppvarming av jordoverflaten fram til år 2030, og at mye av denne oppvarmingen skyldes utslipp av CO₂ fra forbrenning av fossilt brensel. Størrelsen av denne oppvarmingen kan bli alt fra 1^oC til 7^oC, men sannsynligvis mellom 1,5 og 4,5^oC. Noe av oppvarmingen vil bli forsinket på grunn av at det er store reservoarer som skal varmes opp (hav).

Det har foregått en oppvarming på den nordlige halvkule i løpet av de siste 120 årene tilsvarende 0,5^oC. Dette kan skyldes forskjell i mengden av drivhusgasser i atmosfæren, men dette ligger også innenfor de naturlige klimavariasjonene i løpet av de siste 1 000 år, det kan altså ikke med sikkerhet sies at drivhusgassene har forårsaket denne temperaturstigningen. Det er imidlertid sannsynlig at de har bidratt (Hansen, 1988).

Denne oppvarmingen har ikke foregått overalt, f.eks. har Nord-Europa blitt ~0,5^oC kaldere de siste 30 år.

6 ANDRE PÅVIRKNINGER ENN ENERGIFORBRUKET

Ved siden av forbrenning er det mange andre kilder til forandringen av konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren.

Endringer i jordens biomasse er viktig for CO₂-mengden i atmosfæren. Regnskogene i tropene blir hugget for å gi plass til jordbruksarealer. Dette reduserer jordens kapital av biomasse.

Måten jordbruk drives på og distribusjon av naturgass har også innvirkning på mengden drivhusgasser i atmosfæren.

Alt karbon i atmosfæren ender til slutt opp som CO_2 . Utslipp av CH_4 , CO og hydrokarboner vil oksideres til karbondioksid. Levetiden for CH_4 (metan) i atmosfæren er ca. 10 år.

7 VIKTIGE FORSKNINGSMÅL I FREMTIDEN

Det viktigste mål for klimaforskningen er bedre å forstå prosessene som styrer klimaet, for på denne måten å kunne forutsi forandringer av klima i fremtiden. Noen av disse prosessene er beskrevet nedenfor:

- Samspillet mellom atmosfære og hav, hvordan påvirker atmosfæren havet og havstrømmene og omvendt?
- Hvordan påvirker en økning av temperaturen vanndampinnholdet i atmosfæren, skydannelsen og aerosolinnholdet?
- Hvordan påvirker temperaturstigningen smelting av is og hvordan vil havnivået forandre seg?
- Hvordan vil det klimatiske aspektet med forandringen av ozonkonsentrasjonen i stratosfæren forandre utvekslingen mellom stratosfære og troposfære?
- Hva vil skje med økosystemene på jorden, bruk av arealer, osv.?

Før alt dette er klarlagt bedre vil det være vanskelig å kunne gi en nøyaktig beskrivelse av jordens klimaendringer og hva disse fører til. Resultatene fra den forskningen viser at den gjennomsnittlige temperaturen vil øke på jorden.

8 UTSLIPP AV CO₂ FRA ET 200 MWe GASSKRAFTVERK SETT I RELASJON TIL CO₂-PROBLEMATIKKEN

Verdens samlede utslipp av CO₂ til atmosfæren er sterkt økende. Utslippene regnes i dag å være 16 000 Mt/a. I Norge slippes det ut 33 Mt/a. Utslipet i Norge utgjør altså 2⁰/oo av verdens utslipp totalt.

Utslippene i Norge av CO₂ fordelt på forskjellige kildegrupper er gitt i tabell 2 (SSB, 1985).

Tabell 2: Utslipp av CO₂ i Norge fra forskjellige kildegrupper i 1985 i Mtonn pr. år².

Kildegruppe	Utslipp CO ₂ Mtonn pr. år
Stasjonær forbrenning	12,6
Industrielle prosesser	5,5
Mobile kilder	15,0
Totalt utslipp	33,3

Det største bidraget kommer fra mobile kilder. Her bidrar biltrafikken med 7,1 Mt/a. Det nest største bidraget kommer fra stasjonær forbrenning hvor industrien bidrar med 9,2 Mt/a.

Et gasskraftverk vil bidra med ca. 0,6 Mt/a. Dette innebærer en økning i forhold til industriell forbrenning på 7%.

Et gasskraftverk i Norge av størrelse 200 MWe med 7 000 driftstimer vil slippe ut ca. 0,6 Mt/a. Dette er ca. 1,8% av utslippet i Norge. En utbygging av denne størrelsen har altså liten innvirkning på det globale CO₂-utslipp. Ca. halvparten av CO₂-utslippet vil bidra til å øke konsentrasjonen av CO₂ i atmosfæren, resten vil lagres i hav, planter og jordsmonn.

Tabell 3 gir utslipp av CO₂ for forskjellige energibærere. Tabellen viser at brenning av gass istedet for olje fører til reduserte utslipp av CO₂ pr. produsert enhet energi.

Tabell 3: Oversikt over utslipp av CO₂ pr. produsert energi enhet for forskjellige energibærere.

Brensel	Utslipp CO ₂ i g/MJ
Kull	110
Olje	85
Gass	51

9 LITTERATUROVERSIKT

Bolin, B., Döös, B.R., Jäger, J. and Warrick, R.A. (1986) The greenhouse effect, climatic change and ecosystems. Chichester, Wiley (SCOPE 29).

Dickinson, R.E. (1986) How will climate change? The climate system and modelling of future climate. In: The greenhouse effect, climatic change, and ecosystems. Ed. by B. Bolin et al. Chichester, Wiley. (SCOPE 29) pp. 206-270.

Dichinson, R.E. (1987) Uncertainties of estimates of climatic change. In: Workshop on Developing policies for responding to future climatic change, Villach 1987, Background paper 2.

Enting, I.G. (1987) The interannual variation in the seasonal cycle of carbon dioxide concentration at Mauna Loa. J. of Geophys. res., 92, 5497-5504.

Grotch, S. (1988) Regional intercomparisons of general circulation model predictions and historical climate data. Wash. D.C. Dept. of Energy. (DOE/NBA-0084).

Hansen, J., Fung, I., Lacis, A., Rind, D., Russell, G., Lebedeff, S., Ruedy, R. and Stone, P. (1988) Global climate changes as forecast by Goddard Institute for Space Studies three-dimensional model. J. Geophys. Res., 93, 9341-9364.

Hansen, J., Lacis, A., Rind, D., Russell, G., Stone, P., Fung, I., Ruedy, R. and Lerner, J. (1984) Climate sensitivity: analysis of feedback mechanisms. Geophys. Mono., 29, 130-163.

Hansen, J. and Lebedeff, S. (1987) Global trends of measured surface air temperature. J. Geophys. Res., 92, 13.345-13.372.

Hansen, J. and Lebedeff, S. (1988) Global surface air temperatures: update through 1987. Geophys. Res. Lett., 15, 323-326.

Hansen, J.E. (1988) The greenhouse effect: Impact on current global temperature and regional heat waves. New York, NASA Goddard Institute for Space Studies.

Manabe, S., Wetherald, R.T. and Stauffer, R.J. (1981) Summer dryness due to an increase in atmospheric CO₂ concentration. Climatic Change, 3, 347-386.

Manabe, S. and Wetherald, R.T. (1986) Reduction in summer soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. Science, 232, 626-628.

Manabe, S. and Wetherald, R.T. (1987) Large-scale changes of soil wetness induced by an increase in atmospheric carbon dioxide. J. Atmos. Sci., 44, 1211-1235.

Miljøverndepartementet (1988) Ozon og klimaendringer. Oslo.

Ottar, B. (1988) Rapport fra World congress on climate and development. Hamburg, 7-10 November 1988. Lillestrøm (NILU RR 24/88).

Ozone and Climate Contact Committee (1988) Anthropogenic impact on regional and global climate. Report to "Ambetsmannakommittén" of the Nordic Council of Ministers.

Roeckner, E., Schlese, U., Biercamp, J. and Loewe, P. (1987) Cloud optical depth feedbacks and climate modelling. Nature, 329, 138-140.

Smith, I.M. (1988) CO₂ and climatic change. London, IEA Coal Research (IEA CR/07).

Statistisk Sentralbyrå (1988) Miljøstatistikk 1988. Naturressurser og miljø. Oslo (Sosiale og økonomiske studier, 68).

United Nations Environment Programme (1987) The greenhouse gases.
Nairobi (UNEP/GEMS environment library, 1).

Wilson, C.A. and Mitchell, J.F.B. (1987a) A 2x CO₂ climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean. Bracknell, UK., Meteorological Office (Dynamical climatology technical note, 48).

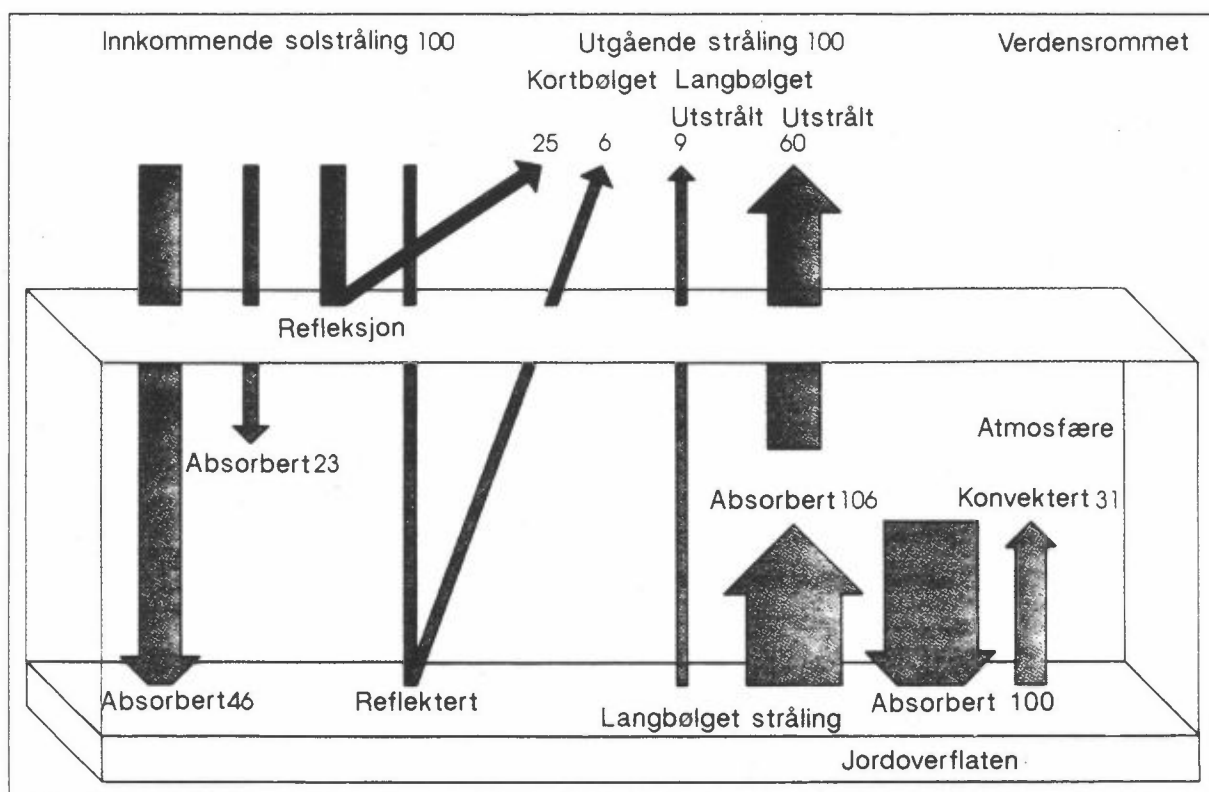
Wilson, C.A. and Mitchell, J.F.B. (1987b) Simulated climate and CO₂ - induced climate change over western Europe. Climatic change, 10, 11-42.

VEDLEGG A

Strålingsbalanse

Jordens temperatur opprettholdes ved at det er balanse mellom innkommende kortbølget solstråling og utgående langbølget stråling.

Hvis en ser for seg 100 enheter med solstråling som treffer toppen av atmosfæren (se figur A1), vil ca. 25 enheter reflekteres tilbake til verdensrommet av luftmolekylene og skydekket. 23 enheter brukes til å varme opp atmosfæren, de resterende 52 enhetene treffer bakken. Bakken reflekterer 6 enheter ut til verdensrommet, mens de 46 andre absorberes.



Figur A1: Jordens energibalanse opprettholdes gjennom et komplekst samspill mellom bakken og atmosfæren. Stråling som er absorbert av bakken blir utstrålt igjen som infrarød stråling fra bakken. Det meste av dette blir absorbert i atmosfæren som igjen stråler ut infrafor stråling til verdensrommet (UNEP, 1987).

Atmosfæren og bakken varmes opp og stråler infrarød energi. Bakken stråler ut 115 infrarøde enheter mot atmosfæren. 9 av disse går rett ut i verdensrommet, og 106 enheter absorberes i atmosfæren. 31 enheter blir konvektert opp i atmosfæren i form av varmluft. Til sammen mister bakken 146 enheter.

Dette kan se ut som om det er mer enn den mottar, men dette er ikke tilfellet da atmosfæren stråler inn 100 enheter mot bakken, slik at nettobalansen blir 15 enheter som bakken taper ved utstråling. Disse 15 enhetene pluss de 31 som blir konvektert utgjør de 46 enhetene som bakken netto taper ved varmestråling, og det er det samme som bakken absorberte av kortbølget lys (sollys).

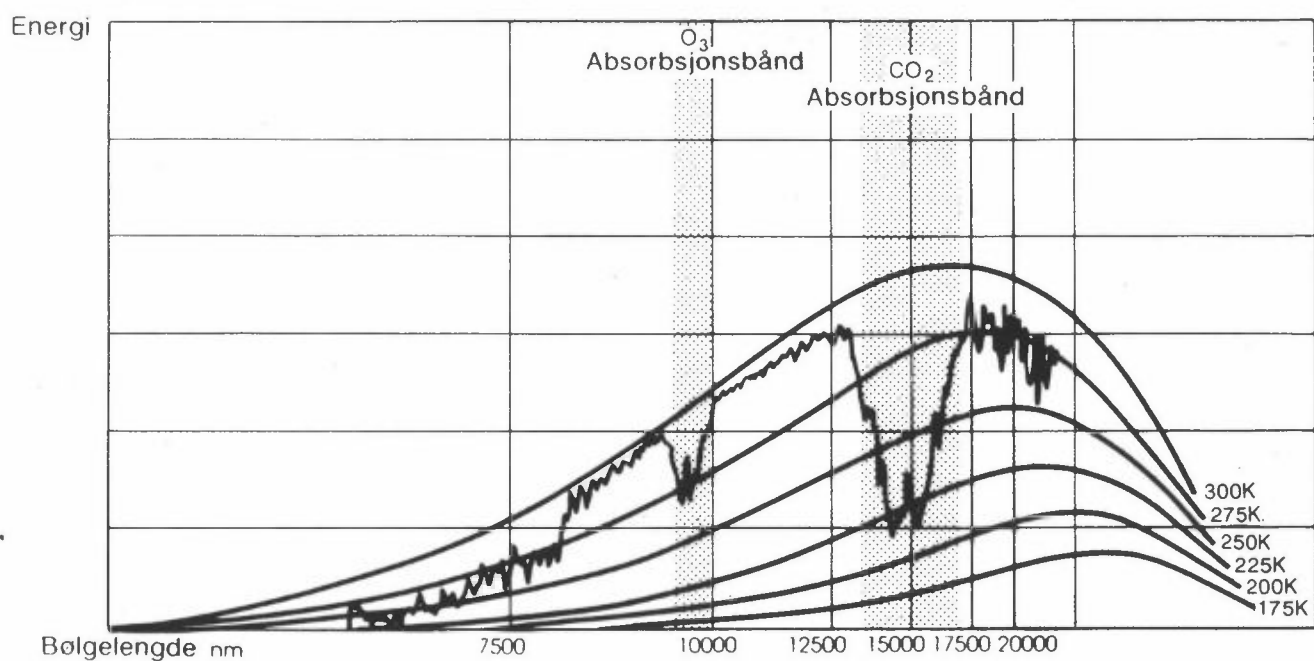
Hvordan opprettholder atmosfæren energibalansen? Den mottar 23 enheter fra solstrålingen. 31 enheter mottas ved konveksjon av luft ved bakken. 106 enheter absorberes av utstrålt infrarød stråling fra bakken, slik at atmosfæren mottar 160 enheter. 100 enheter stråles tilbake til bakken og 60 enheter til verdensrommet.

Verdensrommet mottar 60 enheter fra atmosfæren. 25 enheter av den innkommende solstrålen blir reflektert til verdensrommet av atmosfæren, 6 reflekteres av jordoverflaten, 9 enheter med infrarød stråling fra bakken stråles direkte ut i verdensrommet. Legges disse sammen, fås 100 enheter som er det samme som solen strålte inn mot jord og atmosfære.

Alle disse verdiene varierer svært mellom dag og natt, vinter og sommer. De varierer også med hvor på kloden dette er. Tallene ovenfor er gjennomsnittsverdier.

Figur A2 viser hvordan et "sort legeme" ville stråle energi ut i rommet ved forskjellige temperaturer. Den virkelige strålingen ut i verdensrommet målt fra en satelitt er også vist i figur A1. Satelittmålingene viser to lokale minima som opptrer rundt bølgelengdene $9,5 \mu\text{m}$ og $14,0 \mu\text{m}$. Disse bølgelengdebåndene er de samme som der ozon og karbondioksid absorberer stråling. Hvis konsentrasjonen av ozon og karbondioksid øker, vil mer energi absorberes i disse båndene. Det vil dermed stråle mindre energi ut i verdensrommet, og atmosfæren vil varmes opp.

Nettoresultatet av å øke konsentrasjonen av drivhusgasser er ikke bare en varmere atmosfære. Jordoverflatens klima vil også påvirkes.



Figur A2: Energien utstrålt ved forskjellig temperatur for et "sort legeme" som funksjon av bølgelengder. Den hakkete linjen er utstrålt energi fra jordkloden (bakke + atmosfære) målt med en nimbus satellitt (UNEP, 1987).

