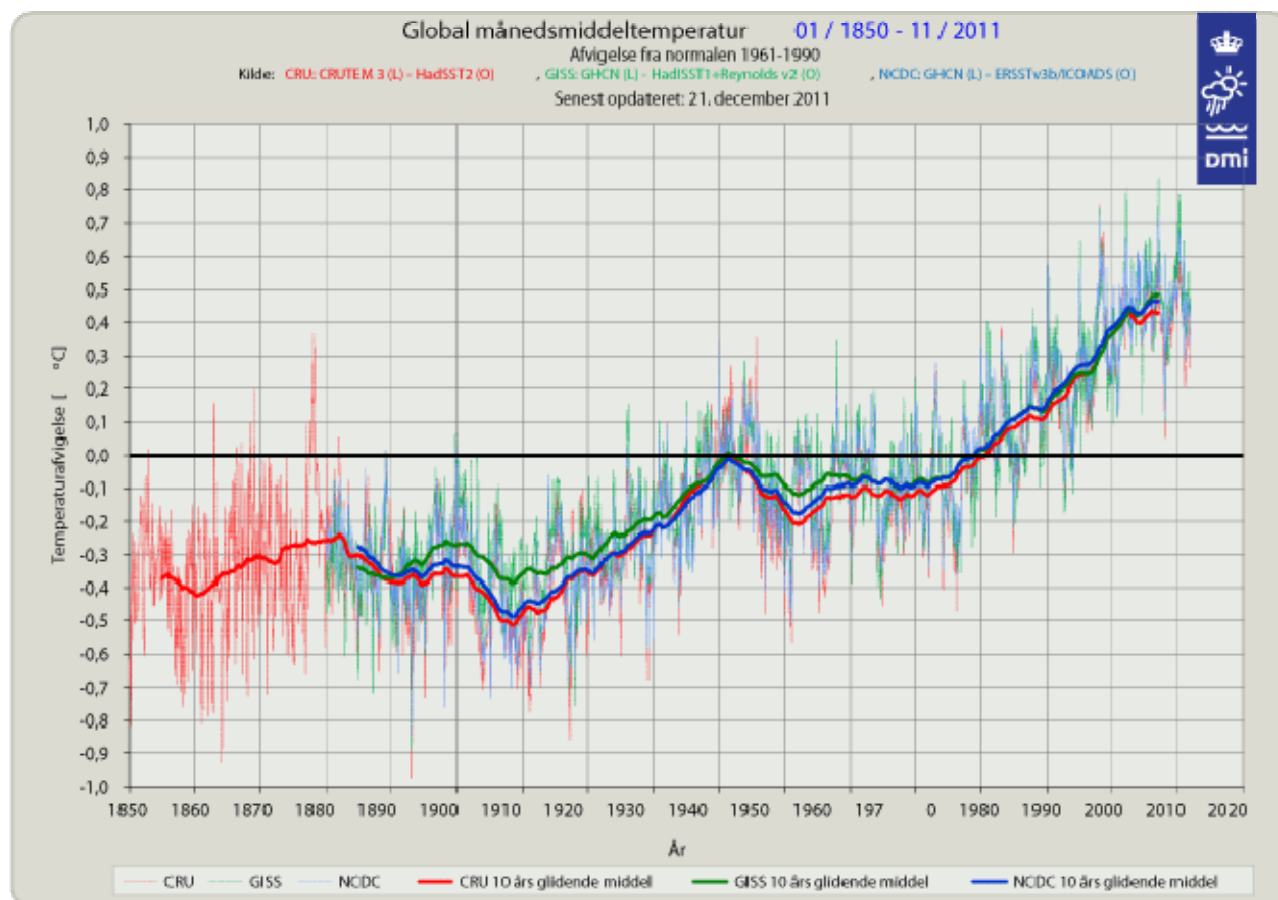


TEMA: Drivhuseffekten

Siden midt i det 19. århundrede er mængden af drivhusgasser i atmosfæren steget, og jorden blevet varmere. Ifølge FN's klimapanel IPCC er det meget sandsynligt, at det skyldes menneskets måde at leve på. Men uden den naturlige drivhuseffekt ville Jorden ikke være et særlig behageligt sted at være, for den globale temperatur ville være omkring 33°C koldere. Læs mere om drivhuseffekten, drivhusgasser og kulstofkredsløb i dette tema.

Jorden er blevet varmere i løbet af de sidste hundrede år, hvor den globale middeltemperatur er steget med 0,74°C. En sandsynlig forklaring på en stor del af denne opvarmning bygger på den menneskeskabte drivhuseffekt. Der er stadig diskussion om, hvor stor en del af den observerede opvarmning, der skyldes denne effekt. Men der er enighed om, at der vil være en stigende effekt i fremtiden, medmindre der gribes kraftigt ind over for afbrænding af fossile brændstoffer (kul, olie og naturgas), og andre drivhusgasudslip, der skyldes menneskets aktiviteter.



Den globale temperaturudvikling. Data er bearbejdet af CRU og indsamlet fra nationale meteorologiske institutter herunder DMI. Figuren opdateres løbende.

Den klimatiske betydning af menneskeskabt drivhuseffekt er et vigtigt emne for Danmarks Klimacenter. Arbejdet baseres i høj grad på beregninger med og udvikling af globale og regionale klimamodeller. Danmarks Klimacenter analyserer og anvender både resultater fra instituttets egne beregninger og beregninger udført ved institutioner i udlandet.

Hvad er drivhuseffekten?

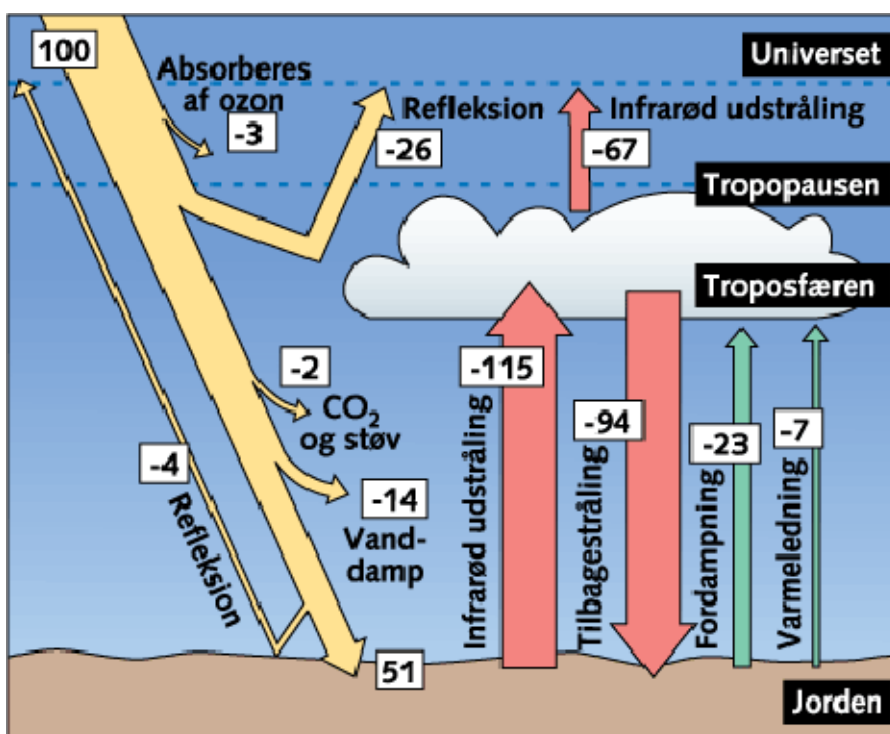
Jorden modtager hele tiden energi fra Solen, i gennemsnit over hele Jorden 342 W/m². Noget af solstrålingen (ca. 30%) kastes tilbage til verdensrummet fra skyerne, luften og Jordens overflade, 20%

absorberes af atmosfæren og resten – ca. 50% – absorberes af land og oceaner, som derved varmes op (se figur nedenfor). Man kan sige, at en stor del af Solens strålingsenergi omdannes til varmeenergi.

Jordoverfladen slipper af med varmen gennem varmestråling til atmosfæren og til verdensrummet. I atmosfæren absorberes varmestrålingen af skyerne og af forskellige gasser, især vanddamp og kuldioxid. Når varmestrålingen fra jordoverfladen absorberes af skyer og gasser, varmes atmosfæren op.

Atmosfæren slipper af med sin varme ved, at skyerne og gasserne udsender varmestråling, både opad og ned mod jordoverfladen, som derved får varmestråling retur. Gasserne virker derfor som en slags isolerende lag, der lader Solens stråler komme ind og forhindrer varmen i at slippe ud – som glasset i et drivhus. Selv om det ikke er de samme fysiske processer, der gør drivhuset og atmosfæren varme, har denne egenskab ved atmosfæren fået navnet *drivhuseffekten*, og de gasser, der er årsag til den, kaldes *drivhusgasser*. Uden drivhuseffekten ville jordoverfladens temperatur alt andet lige være ca. 33°C koldere, end den er, dvs. -19°C i stedet for +14°C, og Jorden ville ikke have liv i den form, vi kender.

De vigtigste drivhusgasser er vanddamp og kuldioxid, men også metan, lattergas, ozon og halocarboner har betydning.



Jordens årlige, globale energibalace. Af den indkommende solstråling absorberes 49% af jordoverfladen, som sender energien op i atmosfæren som varmestråling. Atmosfæren tilføres desuden energi gennem varmeledning fra jordoverfladen og oceanerne samt evapotranspiration, dvs. fordampning af vand, is og sne fra overfladen samt fra planterne. Ved toppen af atmosfæren er der balance mellem den mængde energi, der kommer fra Solen og den, der sendes ud til verdensrummet.

Som det fremgår af ovenstående figur er atmosfærens temperatur globalt set resultat af en kompliceret balance. For et stabilt klima er der balance mellem på den ene side energien i den indkommende solstråling og på den anden side den del af solstrålingen, der sendes tilbage til verdensrummet af jordoverfladen og atmosfæren, samt den varmestråling, der sendes ud til verdensrummet.

Balancen mellem energien i den indkommende og den udsendte stråling gælder som gennemsnit for hele Jorden, men for de enkelte steder vil der være stor forskel. Området omkring ækvator fra 40S til 40N modtager for eksempel mere energi end det tilbagesender – og tilsvarende modtager højere breddegrader mindre energi fra Solen, end de udsender. Det skyldes, at Solens stråler altid rammer mere lige ned omkring ækvator end på højere breddegrader.

Resultatet af disse forskelle er, at der vil være overskud af energi i området omkring ækvator, og dermed ske en opvarmning her, og et lige så stort underskud over resten af Jorden, med en afkøling til følge. Denne opvarmning og afkøling er årsag til vinde i atmosfæren og strømninger i oceanerne. Vindene medvirker til transport af varme og dermed energi fra ækvator mod polerne, og også oceanerne transporterer varme mod polerne. For eksempel betyder Golfstrømmen og den Nordatlantiske Strøm, at klimaet i Nordvesteuropa er noget varmere end på tilsvarende breddegrader andre steder.



Oceanernes strømning i Nordatlanten påvirker vejret i Nordvesteuropa

Hvis der ikke blev transporteret energi i atmosfæren og oceanerne fra ækvator mod polerne, ville temperaturforskellen mellem ækvator og poler vokse, indtil der hvert sted var balance mellem energien i indstrålingen og i den udsendte varmestråling.

Vigtige drivhusgasser

Mange af de luftarter, der sendes ud i atmosfæren af det moderne industrisamfund, er drivhusgasser. Den vigtigste er kuldioxid (CO₂), der forekommer naturligt i atmosfæren ligesom vanddamp, metan, lattergas og ozon. Hertil kommer industrielt fremstillede halocarboner, som både er effektive drivhusgasser og som nedbryder ozonlaget. Nedenfor er de vigtigste gasser og deres kilder beskrevet.

Kuldioxid dannes ved enhver forbrænding af fossile brændsler og biomasse samt ved nedbrydning af organisk stof. Kulstof i form af kuldioxid og biologisk materiale indgår i et kompliceret kredsløb mellem atmosfæren, biosfæren, geosfæren og oceanerne. Selvom de menneskeskabte kuldioxidudslip er små i forhold til de mængder, der transporteres rundt i de naturlige globale kredsløb, vil det tage årtier til århundreder for atmosfæren at indstille sig på en ny ligevægt, hvis tilførsler og fjernelse af kuldioxid ændres. Atmosfærens koncentration af kuldioxid er siden industrialiseringen steget med ca. 35 %. Den stigende koncentration siden industrialiseringen har ført til en strålingspåvirkning på ca. 1,7 W/m².

Af andre vigtige drivhusgasser kan *metan* (CH₄) nævnes. Gassen er primært af organisk oprindelse, og udslippene kommer fra naturlige kilder (for eksempel vådområder, drøvtyggere og insekter), men over halvdelen skyldes menneskeskabs aktiviteter. For eksempel fører udslip fra kullagre og lossepladser, afbrænding af biomasse, risdyrkning og øget husdyrhold til vækst i metankoncentrationen. Også udvinding og brug af naturgas kan føre til udslip, for eksempel ved lækager i gasrør. Atmosfærens indhold af metan er steget med 150 % siden industrialiseringen begyndte, men vækstraten, som varierer

meget fra år til år, er generelt faldet siden 1980'erne. Den øgede metankoncentration har ført til en strålingspåvirkning på ca. 0,5 W/m². Metan nedbrydes ved kemiske processer, og da metans levetid i atmosfæren kun er omkring 12 år, vil ændringer i udslip forholdsvis hurtigt betyde ændringer i atmosfærens koncentration af metan.



Husdyr spiller en stor rolle som producenter af metan. Foto: Anne Mette Jørgensen.

Lattergas (N₂O) er en tredje vigtig drivhusgas, der kommer fra oceanerne og nedbrydning af organisk materiale, mens menneskeskabte kilder er for eksempel landbrugets kvælstofgødning, afbrænding af biomasse og industrielle aktiviteter. Atmosfærens indhold af lattergas er steget 18 % siden industrialiseringen, men vækstraten varierer meget fra år til år. Lattergas nedbrydes ved kemiske processer, og levetiden i atmosfæren anslås til ca. 114 år. Den øgede koncentration af lattergas har ført til en strålingspåvirkning på ca. 0,2 W/m².

Men også *Halocarbonerne* (CFC-gasser m.fl.) har en stor betydning, idet disse gasser har en meget lang levetid i atmosfæren, for eksempel har CFC-115 en levetid på 1700 år. Gasserne har kun menneskeskabte kilder og virker både som effektive drivhusgasser samt nedbryder stratosfærens ozonlag. For at beskytte ozonlaget er der indgået internationale aftaler i den såkaldte Montrealprotokol om at udfase udslippene af CFC-gasser. Væksten i koncentrationen af CFC-gasser falder derfor nu, eller den vokser langsommere end tidligere, fordi udslippene falder. Halocarbonerne har givet en strålingspåvirkning på ca. 0,3 W/m².

Til gengæld vokser koncentrationen af de stoffer (HCFC'er og HFC'er), der erstatter CFC-gasserne. Disse erstatningsstoffer samt andre menneskeskabte industrigasser, som er effektive drivhusgasser (for eksempel PFC'er og SF₆), bidrager kun lidt til ændringer i energibalancen for tiden, men de har meget lang levetid i atmosfæren op til 50.000 år, og koncentrationerne er stigende. Udslip af CFC-gasser og HCFC'er reguleres af Montrealprotokollen. HFC'er, PFC'er og SF₆ indgår i Kyotoprotokollen, som sætter begrænsninger for udslippene, men de fremtidige udslip af alle disse stoffer vil også afhænge af den teknologiske udvikling og udviklingen af nye erstatningsstoffer.

Ozon (O₃) er også en vigtig drivhusgas, som både findes i den mellemste del af atmosfæren (stratosfæren), hvor den beskytter os mod for meget ultraviolet stråling, og i den nederste del, hvor den er en væsentlig bestanddel af den såkaldte fotokemiske luftforurening. Ændringer i ozonkoncentrationerne påvirker energibalancen, men da ozonindholdet varierer med tiden, den geografisk placering og højden, er det langt vanskeligere at bestemme strålingspåvirkningen fra ændringer i ozonen, end den der kommer fra ændringer i de andre drivhusgasser, som er godt opblandet i atmosfæren. IPCC vurderer, at nedbrydningen af ozonlaget i stratosfæren har ført til en negativ strålingspåvirkning (ca. -0,05 W/m²), mens stigningen i ozonindholdet i den nederste del af atmosfæren har ført til en positiv påvirkning (ca. +0,35 W/m²).

De enkelte udledte drivhusgasser bidrager til forøgelse af drivhuseffekten afhængig af deres koncentration og evne til at absorbere varmestråling. Desuden har det også stor betydning, hvor lang levetid gasserne har i atmosfæren. De gasser, der forbliver i atmosfæren i lang tid, vil således få en relativt større betydning for lange tidshorisonter.

For at vurdere virkningen af de forskellige udledte gasser beregnes det såkaldte globale opvarmningspotentiale for de enkelte gasser. Det globale opvarmningspotentiale (på engelsk Global Warming Potential, GWP) udtrykker den drivhusgaseffekt, en given gas har i forhold til den samme vægtmængde kuldioxid.

Nedenfor fremgår et udvalg af gassers globale opvarmningspotentiale for tre tidshorisonter.

Gas	Kemisk formel	GWF		
		20 år	100 år	500 år
Kuldioxid	CO ₂	1	1	1
Metan	CH ₄	72	25	7,6
Lattergas	N ₂ O	289	298	153
CFC -11	CCL ₃ F	6730	4750	1620
CFC-12	CCL ₂ F ₂	11.000	10.900	5200
CFC-13	CCLF ₃	10.800	14.400	16.400
Svovlhexafluorid	SF ₆	16.300	22.800	32.600
Perfluorometan	CF ₄	5210	7390	11.200
Perfluoroætan	C ₂ F ₆	8630	12.200	18.200
HFC-23	CHF ₃	12.000	14.800	12.200
HFC-32	CH ₂ F ₂	2330	675	205
HFC-125	CHF ₂ CF ₃	6350	3500	1100

Globale opvarmningspotentialer for kuldioxid, metan og lattergas samt udvalgte industrigasser for 20, 100 og 500 års tidsperspektiv, Fra IPCC, 2007.

Aerosoler

Afbrændingen af fossile brændsler og biomasse fører ikke kun til udslip af kuldioxid, men også til udslip af stoffer, som danner aerosoler (mikroskopiske luftbårne partikler). Aerosoler virker afkølede på klimaet, dels fordi de spreder sollyset, dels fordi de påvirker dannelsen af skyer – både mængden af skyer (der bliver flere) og størrelsen af de enkelte skydråber.

De menneskeskabte aerosoler har en kort levetid i atmosfæren, typisk nogle få dage, dels fordi de omdannes kemisk, dels fordi de udvaskes af nedbør.

Koncentrationen af aerosoler er derfor størst nær kilderne, det vil sige i de industrialiserede områder.

På grund af aerosolernes korte levetid i atmosfæren vil deres mængde og dermed deres påvirkning af klimaet hurtigt indstille sig efter ændringer i udslippene.

Beregninger med klimamodeller viser, at aerosolernes afkølede virkning ikke kan betragtes som en simpel modvirkning af drivhusgasopvarmningen, og aerosolerne påvirker de regionale mønstre i klimaændringer betydeligt.



Menneskets udledning af svovldioxid danner aerosoler. Foto Lars Lindemann Jørgensen.

Kulstoffets kredsløb

Kulstof indgår i et kompliceret kredsløb i naturen, hvor det hele tiden udveksles mellem reservoirer i oceanet, på land og i atmosfæren. I oceanerne findes kulstoffet især i form af opløst kuldioxid og i levende organismer som plankton, men det største reservoir er dybhavet. På land findes kulstof især i levende planter og i organisk materiale, som nedbrydes i de øverste jordlag. I atmosfæren findes kulstoffet i form af kuldioxid. Endelig findes kulstof i undergrunden som fossilt organisk kulstof og kalksten

Uden en menneskepåvirkning af kulstofkredsløbet ville udvekslingerne af kulstof mellem oceaner, land og atmosfære være stort set i balance, men de menneskeskabte udslip har ført til en stigning i atmosfærens kuldioxid-koncentration på ca. 35 % siden industrialiseringen. I 1990'erne var udslippene til atmosfæren som følge af menneskets aktiviteter, især afbrænding af fossile brændsler, ca. 6,4 gigatons kulstof (forkortes Gt C) pr. år. Fra 2000 til 2005 steg udslippene af drivhusgasser til 7,2 Gt C pr. år.

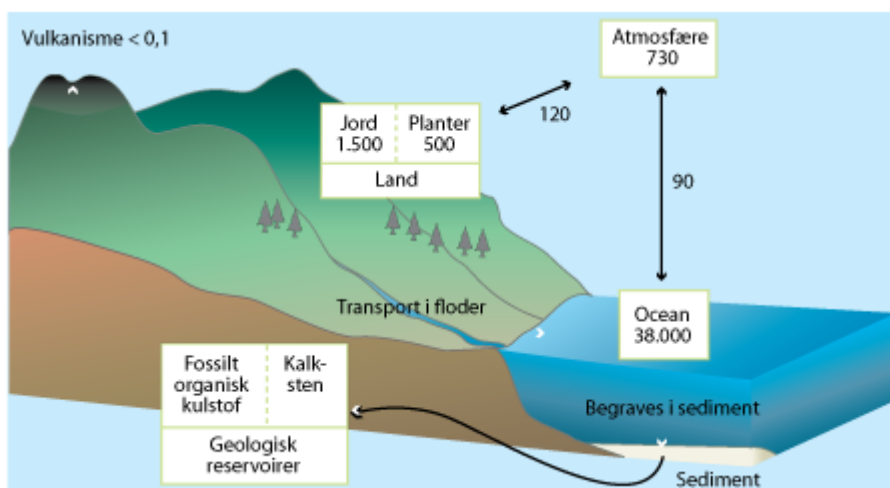
Skovrydning fører til udslip af CO₂, men øget CO₂-indhold i atmosfæren stimulerer plantevæksten, så CO₂ bindes. Totalt førte ændret udnyttelse af jorden samt øget plantetilvækst til, at der i 1990'erne netto blev oplagret 1,6 Gt C pr. år i biosfæren og jorden. Oceanerne har optaget ca. 2,2 Gt C om året. Atmosfærens indhold af CO₂ steg med 3,2 Gt C pr. år i 1990'erne, men i perioden fra 2000 til 2005 er stigningen øget til 4,1 Gt C pr. år, dvs. med en mængde som svarer til over halvdelen af de menneskeskabte CO₂-udslip. Der er imidlertid store variationer fra år til år som følge af klimavariationer, og der er ikke nogen enkel sammenhæng mellem CO₂-udslip og de resulterende koncentrationer i atmosfæren.

Det forventes således, at fremtidige klimaændringer vil påvirke kulstofkredsløbet, ikke mindst fordi de marine økosystemer og systemerne på Jorden på den ene side påvirkes af klimaet og på den anden side selv påvirker klimaet og atmosfærens CO₂-koncentrationer. Til at vurdere hvad fremtidige udslip af CO₂ betyder for atmosfærens CO₂-koncentration, benyttes modeller for kulstofkredsløbet, og der forskes i de processer, som har betydning for dette kredsløb.

Som nævnt forsvinder en del af det udsendte CO₂ i oceanerne. Her spiller Nordatlanten en vigtig rolle, fordi der i de nordlige dele transporteres CO₂ til dybhavet. Målinger viser, at denne transport er reduceret i de senere år, ligesom transporten af varmt vand mod nord i den Nordatlantiske Strøm.

Plantevæksten på landjorden afhænger af temperatur, nedbør, ultraviolet stråling, kvælstofgødning i jorden og CO₂-indholdet i atmosfæren. Derfor spiller både øget CO₂-indhold og klimaændringer en rolle for plantevæksten og derfor for kulstofkredsløbet. Også ændret udnyttelse af jorden som afvanding af engarealer eller plantning/fældning af skov samt ændret landbrugspraksis har stor betydning for kulstofkredsløbet, fordi de organiske stoffer i jordbunden udgør en stor kulstofpulje.

Forskellige plantearter påvirkes forskelligt af ændrede vækstbetingelser. Nogen arter vokser hurtigere, når atmosfærens CO₂-indholdet øges, mens andre typer ikke påvirkes. Umiddelbart kan øget CO₂-koncentration i atmosfæren føre til øget tilvækst og dermed optag af CO₂. Optaget eksempelvis fra skovplantning hører imidlertid op, når træerne har nået deres maksimale størrelse og væksten aftager. Når skoven dør som følge af for eksempel fældning, skovbrand eller stormfald, frigives CO₂. På sigt kan klimaændringer som opvarmning og tørke føre til skovdød, og i et ændret klima er det ikke sikkert, at skoven gendannes.



Kulstof udveksles hurtigt mellem atmosfæren, biosfæren, jorden og de øverste vandlag, hvorimod transporten til dybhavet tager adskillige hundrede år. Oceanerne optager kuldioxid på høje breddegrader, hvor det er koldt, og frigør kuldioxid nær troperne. Planterne optager kuldioxid fra atmosfæren gennem fotosyntese, mens respiration frigør kuldioxid til atmosfæren.

Menneskeskabte klimaændringer

Den vigtigste menneskeskabte klimaændring skyldes den øgede drivhuseffekt, som virker opvarmende i de nederste 10-15 km af atmosfæren. Menneskets aktiviteter øger atmosfærens indhold af drivhusgasser, f.eks. kuldioxid gennem stadig øget afbrænding af fossile brændsler (kul, olie, gas), metan fra øget husdyrhold, lossepladser, afbrænding af biomasse samt risdyrkning, lattergas fra afbrænding af biomasse og fra landbrugets kvælstofgødning. Desuden er mængden af ozon i den nederste del af atmosfæren øget. Endelig virker halocarboner og nye stoffer fra industrien opvarmende, men udslip af halocarboner har også en (indirekte) afkølede virkning i omkring 15 km højde, fordi gasserne nedbryder ozonlaget.

Ændringer i landoverfladernes beskaffenhed forårsaget af f.eks. skovrydning eller -rejsning, ændret landbrugspraksis eller bebyggelse påvirker også klimaet. F.eks. viser målinger, at en opvoksende skov

lokalt fører til øget nedbør. Ændringer i arealanvendelse vil desuden påvirke det globale kulstofkredsløb og dermed også det globale klima, fordi kulstof indgår i et kompliceret kredsløb i naturen mellem atmosfære og oceaner, jordoverfladen og planterne.

En anden menneskeskabt påvirkning kommer fra flytrafikken. Fly slipper gasser, især vanddamp og kuldioxid, samt partikler direkte ud i atmosfæren. Alle kender de hvide striber på himlen efter flyudstødning, såkaldte kondensstriber eller contrails, der dannes af vanddampen. Nogen gange forsvinder striberne hurtigt igen, men andre gange kan der – afhængigt af atmosfærens temperatur og indhold af vanddamp – i områder med meget flytrafik blive så mange, at de slører Solen. Contrails virker opvarmende på jordoverfladen, ligesom høje tynde skyer.

Tilbagekoblinger

Når jordoverfladen bliver varmere eller koldere, sker der også andre ændringer i klimasystemet, som kan forstærke eller dæmpe opvarmningen eller afkølingen. Dette gælder uanset om årsagen til opvarmning eller afkøling er naturlig eller menneskeskabt. For eksempel fører øget drivhuseffekt til opvarmning af atmosfæren. En opvarmet atmosfære kan indeholde mere vanddamp end en koldere, og da vanddamp er en drivhusgas, betyder mere vanddampindhold yderligere opvarmning; man taler om en positiv tilbagekobling.

En opvarmning vil også generelt betyde mindre snedække over kontinenterne og mindre havis. Da sne og is tilbagekaster mere sollys til verdensrummet end jord/planter og havvand, betyder mindre sne og havis en yderligere opvarmning, altså igen en positiv tilbagekobling.



Sne og is reflekterer mere lys tilbage til verdensrummet end jord/planter og havvand. Foto: Gorm Dybkjær.

Der er også negative tilbagekoblinger, dvs. tilbagekoblinger som begrænser temperaturændringerne. En sådan negativ tilbagekobling er for eksempel varmestrålingen fra jordoverfladen og atmosfæren. Hvis temperaturen øges, vokser også varmestrålingen til rummet, og det begrænser den oprindelige temperaturstigning.

Der sker også ændringer i skymængder og skytyper, når klimaet ændres. Skyer har to modsat rettede virkninger i klimasystemet: For det første kaster de en del af det sollys, der ellers ville nå ned til

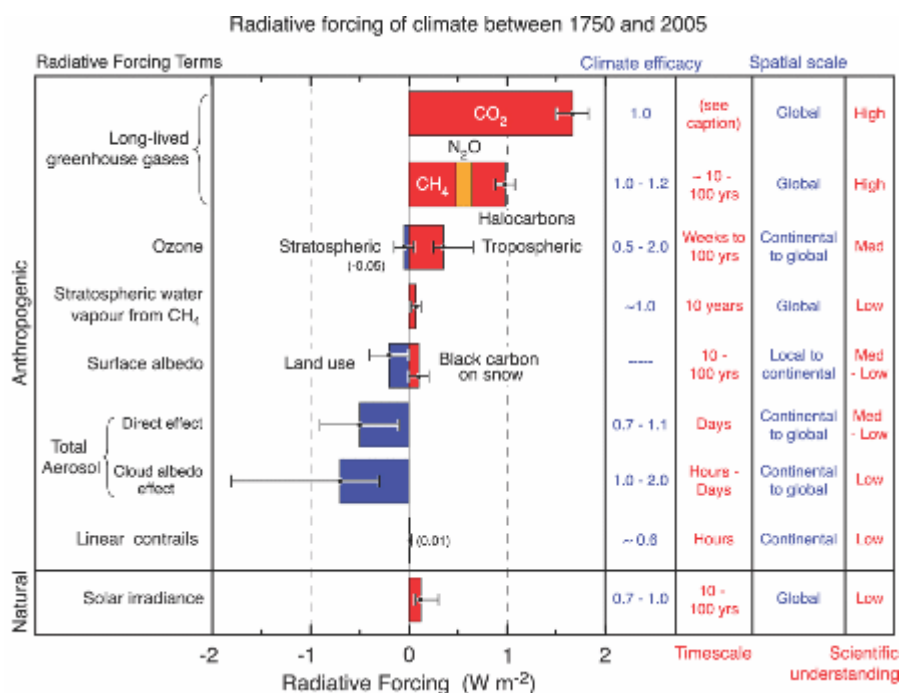
jordoverfladen, tilbage til verdensrummet, og for det andet øger de drivhuseffekten. Derfor kan der være både negative og positive tilbagekoblinger, og den samlede tilbagekoblingseffekt af skyer i et varmere klima er usikker.

Endelig er der tilbagekoblinger mellem atmosfærens kuldioxidkoncentration, klimaet og biosfæren. For eksempel kan et varmere klima med mere CO₂ i atmosfæren føre til øget plantevækst, som dermed optager CO₂ fra atmosfæren.

Tilbagekoblinger og vekselvirkningerne mellem klimasystemets dele er komplicerede. Det betyder, at der ikke er nogen enkel sammenhæng mellem en påvirkning af klimaet og den resulterende klimaændring. For eksempel kan man ikke forvente, at en dobbelt så stor klimapåvirkning giver dobbelt så store klimaændringer. Man kan heller ikke forvente, at klimaændringerne kommer præcis dér, hvor klimaet påvirkes. For at forstå processerne og beskrive fremtidige klimaændringer er det derfor nødvendigt at benytte komplicerede klimamodeller.

Strålingspåvirkning

For at sammenligne styrken af de forskellige påvirkninger af Jord-atmosfæresystemets energibalance, benyttes begrebet strålingspåvirkning, som er en fysisk beregning af, hvor stor en mængde strålingsenergi, der tilføres (positiv strålingspåvirkning) eller fjernes (negativ påvirkning) fra klimasystemet. Man udtrykker påvirkningen af energibalancen i Watt pr. kvadratmeter (W/m²).



Jordens og atmosfærens energibalance påvirkes af mange faktorer. Den samlede virkning kan illustreres ved faktorenes såkaldte strålingspåvirkning, der måles i W/m². Figuren viser bidragene fra den forøgede koncentration af drivhusgasser og aerosoler samt andre ændringer i atmosfærens sammensætning, ændringer i Solens stråling og i Jordens refleksionsevne (albedo). [Kilde: IPCC \(2007\), s. 32.](#)

Den stigende mængde kuldioxid, metan, lattergas og halocarboner i atmosfæren har ifølge IPCC påvirket energibalancen med +2,62 W/m² siden industrialiseringen begyndte. Heri er indregnet en direkte påvirkning fra halocarboner på tilsammen ca. 0,32 W/m². Imidlertid er deres *netto*-påvirkning ca. +0,05 W/m² mindre, fordi de har nedbrudt dele af ozonlaget i stratosfæren.