

Drivhuseffekten

Af Jens Olaf Pepke Pedersen, DTU Space

Nogle af gasserne i Jordens atmosfære absorberer den infrarøde stråling fra Jorden og opvarmer dermed atmosfæren. Vanddamp er langt den vigtigste gas i denne drivhuseffekt, men der er stor opmærksomhed omkring kuldioxid. Sådan har det imidlertid ikke altid været, men det er fortsat svært at afgøre, hvor meget varmere det bliver på grund af kuldioxid. En modelberegning, der blandt læserne af Videnskab.dk blev valgt til Årets Danske Forskningsresultat¹, tyder på, at virkningen stiger med temperaturen.

Kuldioxid – CO₂ – er essentielt for livet på Jorden. Det er nødvendigt for planternes fotosyntese og dermed for hele fødekæden, det er ugiftigt, det lugter ikke og hvis det ikke var fordi CO₂ også har betydning for energistrømmene i atmosfæren, ville der næppe være ret mange politikere, der havde hørt om CO₂.

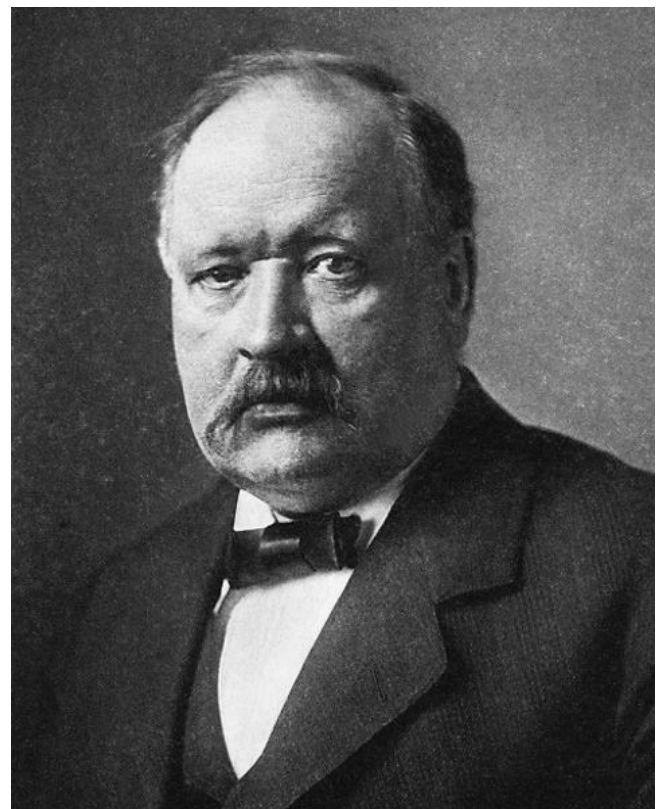


Figur 1: Joseph Fourier (1768 –1830)

I meget lang tid var der dog heller ikke den store opmærksomhed om CO₂. Ganske vist havde den den franske fysiker og matematiker Joseph Fourier (1768 –1830), som nok er mere kendt for at have fået Fourier-transformationen opkaldt efter sig, allerede i 1827 beskrevet drivhuseffekten kvalitativt [1]. Det var noget af en bedrift på et tidspunkt, hvor termodynamikken først var ved at blive udviklet, men det var ikke et resultat, der vakte større opsigt i samtiden.

Noget uretmæssigt bliver den svenske kemiker Svante Arrhenius (1859-1927) ofte nævnt som opda-

geren af drivhuseffekten, og men hans fortjeneste er, at han som den første i 1896 beregnede, hvor meget en fordobling af CO₂-koncentrationen i atmosfæren ville betyde for den globale temperatur [2]. Denne størrelse kaldes også for klimafølsomheden overfor CO₂. Arrhenius kom frem til, at en CO₂-fordobling ville øge temperaturen med 6°C, hvilket nogle gange bliver fremhævet som overraskende tæt på moderne resultater. I Arrhenius' tilfælde var resultatet nu mere held end gode beregninger, for selvom hans beregning var baseret på datidens state-of-the-art, indeholdt den to store fejlkilder, som trak i hver sin retning.



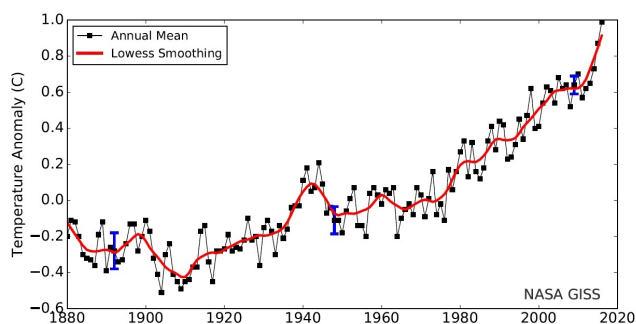
Figur 2: Svante Arrhenius (1859-1927)

Hans svenske kollega, fysikeren Knut Ångström² (1857-1910) viste kort efter ved at måle spektret af CO₂, at absorptionsbåndene for CO₂ i atmosfæren allerede var mættede. Konklusionen var derfor, at mere

¹<http://videnskab.dk/naturvidenskab/vinderne-af-aarets-danske-forskningsresultat-sejr-for-klimaforskningen>

²Knut Ångström er søn af den svenske fysiker Anders Jonas Ångström (1814-74), og det er faderen Anders, der har lagt navn til enheden Ångström (1 Å = 10⁻¹⁰ m).

CO₂ i atmosfæren ikke ville ændre noget på energibalancen i atmosfæren og dermed heller ikke have nogen særlig effekt på den globale temperatur.



Figur 3: Global temperatur (land og ocean) 1880-2017 (NASA).

Nu var klimaændringer ikke nogen nyhed i starten af 1900-tallet, og ikke mindst i 1920'erne og 1930'erne kunne man konstatere, at Jorden blev varmere (se figur 3), med særligt tydelige forandringer i Arktis. Der var dog ikke den store interesse for at finde årsagen til de aktuelle klimaændringer, og interessen samlede sig i stedet om at forklare de store istider, som man kunne se tydelige spor af i landskabet. Især den serbiske fysiker Milutin Milanković (1879-1958) bidrog til en forklaring på istiderne med sin teori om, at istiderne var styret af små variationer i solindstrålingen på grund af ændringer i Jordens bane og rotationsakse.

Konsensus: CO₂ har ingen klimaeffekt

Men med hensyn til de aktuelle klimaændringer var den fremherskende holdning blandt forskerne dengang, at det da var interessant, at vi kunne se, at klimaet ændrede sig, men der var også konsensus om, at det ikke havde noget med menneskelige aktiviteter at gøre.

Der var dog også skeptikere, som den britiske ingeniør Guy Stewart Callendar (1897-1964), der imidlertid kun havde meteorologi som hobby. Han argumenterede for drivhusteorien med den begrundelse, at selvom CO₂ allerede absorberede den infrarøde stråling fra Jorden, ville mere CO₂ betyde, absorptionen skete højere oppe i atmosfæren, hvilket ifølge hans beregninger ville føre til opvarmning. Callendar kunne også – omend på et noget spinkelt grundlag – beregne, at temperaturen ved en CO₂-fordobling var 2°C. Han påpegede også, at både temperatur og CO₂ i atmosfæren var steget i løbet af det sidste halve århundrede, hvilket den daværende direktør for det britiske meteorologiske institut – og autoriteten på området – George Simpson (1878–1965) dog afviste som en tilfældighed. Selvom Callendar holdt fast ved sin teori helt frem til sin død i 1964, blev den i hele perioden bestridt eller fortiet af hovedparten af det videnskabelige samfund.

Problemet var blandt andet, at den globale temperatur siden 1940'erne var begyndt at falde igen, og vi skal helt frem til midten af 1970'erne før drivhuseffekten begynder at blive taget mere seriøst. På det tidspunkt var bekymringen for global afkøling, og dermed muligheden for en ny istid, imidlertid større end bekymringen for global opvarmning.



Figur 4: Guy Stewart Callendar (1897-1964)

En førende klimatolog var tyskeren Helmut Landsberg (1906-85), der i en oversigtsartikel i 1970 skrev, at vi ikke vidste meget om menneskeskabte klimaændringer, og i værste fald mente han, at stigningen i CO₂-koncentrationen med den nuværende hastighed højst ville medføre en temperaturstigning på 2°C i løbet af de næste 400 år. Den engelske klimatolog Hubert H. Lamb (1913-97), der er grundlæggeren af den britiske Climatic Research Unit, mente, at virkningen af CO₂ var tvivlsom og han påpegede ganske korrekt, at CO₂ ikke kunne redegøre for de mange klimaændringer, han havde afdækket fra middelalderen til nutiden.

Sidst i 1970'erne blev det klart, at afkølingen siden 1940'erne på ny var afløst af en periode med opvarmning, og samtidig begyndte der at komme iskernemålinger fra Grønland og Antarktis, der viste, at CO₂-koncentrationen i atmosfæren havde ændret sig meget med temperaturen over tusinder af år. CO₂ måtte derfor have betydning som drivhusgas, der i hvert fald kunne forstærke ændringer i klimasystemet. Det amerikanske videnskabsakademi, National Academy of Sciences, nedsatte derfor en ad hoc-gruppe, ledet af meteorologen Jule Charney (1917-81), som skulle undersøge, om CO₂ fra fossile brændstoffer kunne påvirke klimaet. I en kort rapport på 22 sider konkluderede gruppen, efter at have gennemgået stabiliserende mekanismer i klimasystemet, at CO₂ måtte betragtes som en væsentlig en faktor i klimaet [3]. På grundlag af en gennemgang af forskellige modelberegninger anslog gruppen endvidere, at klimafølsomheden for CO₂ lå et sted mellem 1,5 og 4,5°C.

Konsensus: CO₂ har en klimaeffekt

Herefter blev der stigende opmærksomhed omkring CO₂'s rolle, og da den globale temperatur samtidig begyndte at stige igen, førte det også voksende bekymring for klimaændringer, men nu overfor et varmere klima. Det førte i 1988 til oprettelsen af FN's klimapanel (IPCC), som siden har offentliggjort ialt fem store klimarapporter. Den sidste udkom i 2013, og måske lidt overraskende er konklusionen i den seneste rapport fortsat, at klimafølsomheden for CO₂ ligger et sted mellem 1,5 og 4,5°C. Næsten 40 års omfattende klimaforskning har således ikke gjort det muligt at bestemme klimafølsomheden mere præcist.

Når det er så svært, skyldes det, at vi ikke bare kan måle klimafølsomheden direkte i selve klimasystemet. Desuden virkning forstærkes effekten af CO₂ af vanddamp, skyer og andre komponenter i Jordens atmosfære. En CO₂-fordobling vil i sig selv kun give anledning til en opvarmning på omkring 1°C. Men fordi denne opvarmning ændrer på blandt andet mængden af vanddamp, forstærkes opvarmningen og bliver større. Mange af disse effekter er omgærdet af stor usikkerhed, og derfor er klimafølsomheden en svær størrelse at få styr på. I stedet må man ty til modelberegninger eller se på, hvordan temperatur og CO₂ har varieret førhen. Disse analyser har haft en tendens til at give forholdsvis lave værdier for klimafølsomheden, især hvis man tager de nyeste data efter år 2000 med, hvor temperaturen ikke har ændret sig så meget, selvom CO₂-koncentrationen er steget.



Figur 5: Bispehøjen på Limfjordsøen Fur er en høj top af møler med talrige lag af aske fra de enorme vulkanudbrud, der fandt sted omkring nutidens Island i overgangen mellem palæocæn og eocæn for 56 millioner år siden, hvor Jorden var langt varmere end i dag. (Foto: K.P. Pedersen)

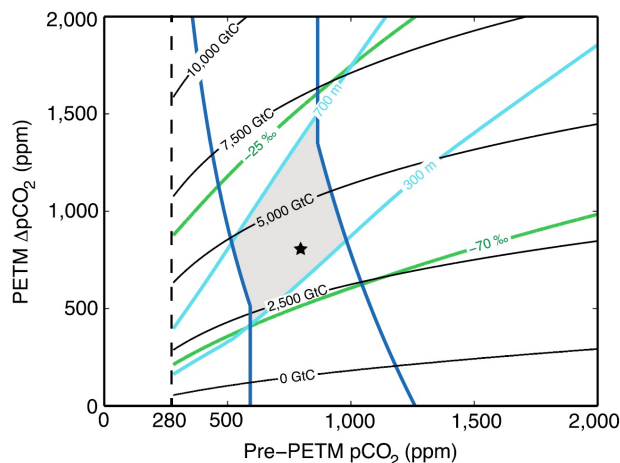
CO₂ i Jordens fortid

En anden mulighed er at gå tilbage i Jordens geologiske fortid, hvor overgangene mellem de geologiske perioder ser ud til at være ledsaget af dramatiske ændringer i klimaet. En af de særligt interessante overgange er mellem paleocæn og eocæn for 56 millioner år siden, hvor kloden oplevede en kortvarig, men kraftig opvarmning. Overgangen er blevet kendt som det paleocæne-eocæne termale maksimum (PETM) og har længe været fremhævet som et forhistorisk eksempel på en global opvarmning, der kunne minde om nutidens.

³Størrelsen $\delta^{13}\text{C}$ angiver ændringen (typisk i promille) i $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ forholdet, målt i forhold til en standard. Standarden kaldes Pee Dee Belemnite (PDB) efter det marine fossil, *Belemnitella americana*, fra Peedee Formation i South Carolina hvor $^{13}\text{C}:^{12}\text{C}$ forholdet er 0.0112372.

I forvejen har rekonstruktioner af paleocæn vist, at Jorden dengang var omkring 10°C varmere end i dag, og under selve PETM steg temperaturen med yderligere 5°C. Den ekstra stigning blev formodentlig udløst af store undersøiske lagre af metanhydrat, som blev ustabile og boblede op til atmosfæren, hvor metan (CH₄) virker som en kraftig drivhusgas. I atmosfæren har CH₄ en levetid på omkring 9 år, hvorefter det omdannes til CO₂, men hvis atmosfæren indeholder meget CH₄ stiger levetiden og forøger dermed virkningen af CH₄.

Ved hjælp af modellen DCESS (Danish Center for Earth System Science [4]) har vi analyseret PETM-overgangen. Her er et af problemerne, at vi ikke har en præcis viden om sammensætningen af Jordens atmosfære før og under PETM, som derfor må bestemmes indirekte. Her kan forekomster af forskellige former for natriumkarbonater i aflejringer fra PETM overgangen sammen med isotopanalyser af kulstoffet fra andre aflejringer bruges til at afgrænse de mulige koncentrationer af CO₂ (se figur 6)[5].



Figur 6: Mulige intervaller for CO₂-koncentrationen i atmosfæren før PETM og stigningen (ΔpCO_2) under PETM. Forekomsten af en bestemt form af natriumkarbonat giver afgrænsningen vist med de mørkeblå linjer, og kalciumkarbonat i sedimenter under havbunden giver afgrænsningen vist med de lyseblå linjer. Tilsammen definerer de det skraverede grå område, og stjernen markerer et muligt PETM-scenarie.

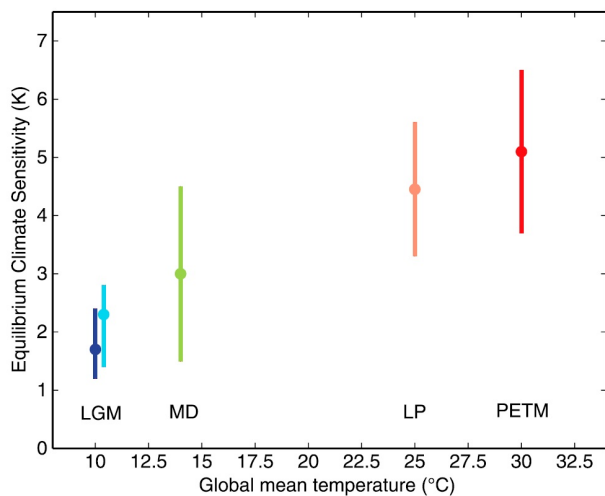
De mineralogiske og andre data fra PETM kan nu kombineres med modelkørsler for at beregne atmosfærens koncentration af CO₂ såvel før som i løbet af PETM episoden, ligesom kilden til CO₂-udslippene også kan vurderes. De sorte linjer i figur 6 viser den mængde kulstof (i Gigaton), der i modellen er nødvendigt for at øge temperaturen under PETM med 5°C, og de grønne linjer viser den såkaldte $\delta^{13}\text{C}$ -værdi³ kulstoffet skal have for at gengive den ændring i kulstofisotoperne, som fås fra sedimenterne.

Metan af biologisk oprindelse har typisk meget negative $\delta^{13}\text{C}$ -værdier på -60 promille (nederste grønne kurve), mens organisk materiale har værdier på omkring -25 promille (øverste grønne kurve).

Modelkørslerne kan nu bruges til at beregne, hvilken mængde CO₂, der er nødvendig for at frembringe en

temperaturstigning på 5°C og dermed kan vi beregne en klimafølsomhed for CO₂ under PETM.

Resultatet viste, at klimafølsomheden ikke er en konstant størrelse, men ser ud til at stige med opvarmningen. Værdien stiger således fra omkring 4,5°C (3,3–5,6°C) før PETM til 5,5°C (3,7–6,5°C) under PETM (se figur 7).



Figur 7: Den grønne bjælke (MD) viser klimafølsomheden i dag, hvor gennemsnitstemperaturen er ca. 14°C og klimafølsomheden er ca. 3°C. Den blå bjælke (LGM) er beregninger af klimafølsomheden under den seneste istid, hvor de globale gennemsnitstemperaturer var omkring 3–4°C lavere end i dag. De nye resultater viser klimafølsomheden sidst i palæocæn, den orange bjælke (LP), med temperaturer ca. 10°C højere end i dag, og under PETM (den røde bjælke), for 56 millioner år siden, hvor temperaturen var 15°C højere end i dag, og klimafølsomheden også var væsentlig højere

Dermed bliver virkningen af CO₂ større i et varmere klima end i et koldere klima, og den globale opvarmning kan således få en selvforstærkende effekt. At klimafølsomheden stiger med temperaturen støttes også af nye og uafhængige beregninger fra sidste istid, som viser, at klimafølsomheden i det kolde istidsklima kun var 2°C og dermed noget lavere end i dag. Vi er dog i dag er meget langt fra de høje temperaturer i paleocæn, og effekten af den øgede klimafølsomhed derfor vil være mere beskedent.

Samtidig viser studiet, at den mængde kulstof, som drev PETM-opvarmningen, var af omtrent samme størrelse som de nuværende reserver af fossile brændsler på omkring 4.000 milliarder tons. Dengang gav det som nævnt en opvarmning på fem grader, og når stigningen trods alt ikke blev større, skyldes det, at det ekstra CO₂ blev tilført til en atmosfære, hvor CO₂-koncentrationen i forvejen var meget høj – formodentlig 800 ppm (stjernen i figur 6). I en sådan atmosfære vil et udslip på 800 ppm øge CO₂-indholdet til 1600 ppm, og dermed svare til en fordobling. I dag, hvor CO₂-indholdet i atmosfæren kun er 400 ppm, vil den samme mængde øge koncentrationen til 1200 ppm, men det svarer til at nutidens CO₂-niveau øges 3 gange. Dermed vil den samme mængde CO₂ som under PETM give en langt større temperaturændring i dag end i paleocæntiden, og det vil derfor være en dårlig ide at bruge alle reserverne af fossile brændsler.

Til gengæld ser det ikke ud til, at den ekstra op-

varmning under PETM har sat sig større spor i livet på landjorden. Det er svært at finde eksempler på dyrearter, der uddøde på grund af episoden. Faktisk udviklede der sig efter PETM en række nye arter, der er forfædre til nutidens heste, får, køer og primater – og således også mennesket. Det samme kan man ikke sige om dyrelivet i oceanet, hvor en lang række encellede organismer, de såkaldte foraminiferer, uddøde især i dybhavet. Samtidig blomstrede andre arter i oceanet op, så denne uddøen kan også skyldes andre effekter end den direkte opvarmning af havet – for eksempel manglende ilt og forsurening på grund af de store mængder CO₂.

På klimatopmødet i Paris i 2015 lykkedes det i en sen natteftime forsamlingen at nå til enighed om, at den globale temperatur fremover kun må stige med 2°C. Om den målsætning vil lykkes, afhænger imidlertid ikke blot af, hvor store mængder drivhusgasser landene fremover vil udlede, men især af hvor stor virkningen af den ekstra mængde drivhusgasser er på atmosfærens temperatur.

Erfaringerne fra Jordens fortid peger derfor i flere retninger. Naturen trives tilsyneladende fint med høje temperaturer, men forskellen er, at vi i dag har meget mindre sammenhængende natur, fordi vi har inddraget store områder til landbrug og gennemskåret den resterende natur med veje og jernbaner. I forhold til tidligere vil nutidens dyre- og planteliv derfor have sværere ved at håndtere kommende klimaudsving.

Referencer

1. J. Fourier, Mémoire sur les Température du Globe Terrestre et des Espaces Planétaires. *Mémoires de l'Académie Royale des Sciences* **7**, 569–604 (1827).
2. S. Arrhenius, On the Influence of Carbonic Acid in the Air upon the Temperature of the Ground. *London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science (fifth series)* **41**, 237–275 (1896).
3. National Research Council, *Carbon Dioxide and Climate: A Scientific Assessment*.
4. G. Shaffer, S. M. Olsen, J. O. P. Pedersen, Presentation, calibration and validation of the low-order, DCESS Earth System Model (Version 1). *Geoscientific Model Development* **1**, 17–51 (2008).
5. G. Shaffer, M. Huber, R. Rondanelli, J. O. P. Pedersen, Deep time evidence for climate sensitivity increase with warming. *Geophysical Research Letters* **43**, 6538–6545 (2016).



Jens Olaf Pepke Pedersen er seniorforsker på institut Rumforskning og Rumteknologi på Danmarks Tekniske Universitet samt medlem af Kvants redaktion.