

# Beregning af Jordens middeltemperaturstigning ved en fordobling af CO<sub>2</sub>-indholdet i atmosfæren

Torben Lund, Emil Storr-Hansen, Victor Valdemar Eierslev Christensen, Caspar Helge Ulla Nilsson, Daniel Vestmar Norén og Sebastian Helboe Empacher, Institut for Naturvidenskab og Miljø, Roskilde Universitet

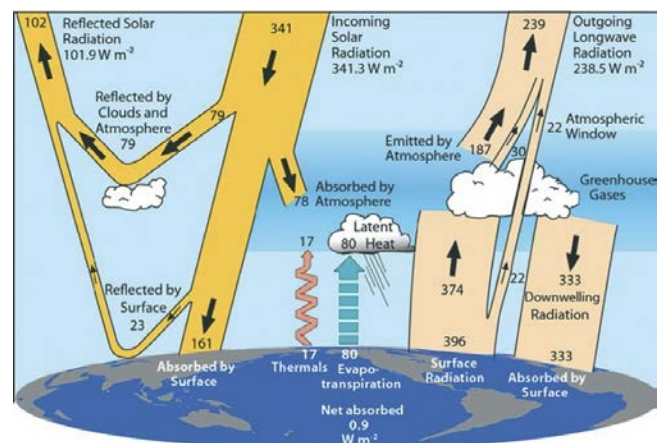
I artiklen opstilles en simpel model til beskrivelse af drivhusgassen CO<sub>2</sub>'s indflydelse på Jordens middeltemperatur. Modellen er baseret på strålingsligevejtsmodellen og med en opdeling af atmosfærens første 10 km (troposfæren) i lag på 1 km og konstant temperatur for stratosfæren på 220 K. Ved en fordobling af CO<sub>2</sub>-koncentrationen fra 400 til 800 ppm forudsiger modellen en forøget opvarmning (radical forcing,  $RF$ ) af Jorden på 6,9 W/m<sup>2</sup>, som kan omregnes til en global middeltemperaturstigning på 1,9°C, for den isolerede virkning af CO<sub>2</sub>. Modellen beskriver fint den logaritmiske lineære sammenhæng mellem  $RF$  og CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren og kan afvise CO<sub>2</sub>-hypotese-skeptikernes argument om den allerede "mættede CO<sub>2</sub>-atmosfære".

Ved et middagsselskab sidste år i juni efter klimavalget, hvor denne artikels førsteforfatter deltog, blev regeringens ambitiøse CO<sub>2</sub>-reduktionsmål på 70 % livligt diskuteret. Til min overraskelse erklærede en af mine gode venner og kemiker, at han ikke troede på det herskende paradigme om, at den globale opvarmning skyldes menneskehedens udledning af CO<sub>2</sub> til atmosfæren. Jeg blev henvist til CO<sub>2</sub>-hypotese-skeptikerne Ole Humlum og Johannes Krügers velskrevne bøger [1, 2] samt henvisninger til internettet, at atmosfæren allerede er "mættet" med CO<sub>2</sub> [3]. Mætningsargumentet går ud på, at infrarød varmestråling udsendt fra Jorden i det bølgelængdeinterval, hvor CO<sub>2</sub> absorberer (14–15 μm), ikke når længere op i atmosfæren end ca. 250 m, før 99 % af strålingen er absorberet. En øget CO<sub>2</sub>-koncentration vil derfor ikke gøre fra eller til og derfor ikke øge den globale opvarmning. Min egen daværende forståelse af klimaproblematikken byggede på den simple drivhusmodel, der beskriver, hvorledes Solens kortbølgede, synlige lys passerer stort set uhindret gennem atmosfæren, mens den langbølgede varmestråling fra Jorden delvist tilbageholdes af drivhusgasserne H<sub>2</sub>O og CO<sub>2</sub> i atmosfæren – altså analogt til varmeskabelsen i et drivhus, hvor atmosfæren er "erstattet" af glas.

Drivhusmodellen er formidlet i en fremragende pædagogisk fremstilling til gymnasiet af Laura M. Jensen og Hans B. Jensen [4]. Modellen er rent kvalitativ og kan ikke kvantitativt forudsige stigningen i den globale middeltemperatur ved en forøgelse af CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren, ej heller kan den argumentere imod påstanden om den CO<sub>2</sub>-mættede atmosfære. Jeg var derfor ikke i stand til at give min ven igen med videnskabelige modargumenter og besluttede efterfølgende at forsøge at nå et spadestik dybere i forståelsen af CO<sub>2</sub>'s indvirkning på klimaet ved at udbyde klimaproblematikken som et 3. semesterprojektforslag på den naturvidenskabelige bacheloruddannelse på Roskilde Universitet [5].

I projektet har vi valgt at anvende den relativt simple strålingsligevejtsmodel [6] til beregning af temperaturstigningen ved en fordobling af CO<sub>2</sub>-koncentrationen i atmosfæren og via modellen argumentere for, at CO<sub>2</sub>-mætningshypotesen er forkert. Det

har været et mål for projektet at forsøge at formidle modellen og beregningerne pædagogisk, så fremstillingen med lidt lærerhjælp forhåbentlig vil kunne være til inspiration for gymnasieelever med højt niveau i matematik og fysik. Klimaproblematikken har tidligere været behandlet i en række Kvantartikler [6-9], men til vores overraskelse er der ikke tidligere skrevet formidlingsartikler på dansk, der kvantitativt forsøger at beregne den isolerede effekt af en øget CO<sub>2</sub>-koncentration i atmosfæren på Jordens middeltemperaturstigning.



**Figur 1.** Årligt gennemsnit af Jordens energiflow for 2000-2005 [10]. Tallet 341,3 W/m<sup>2</sup> er den indgående solstråling, 101,9 W/m<sup>2</sup> er den reflekterede solindstråling og 238,5 W/m<sup>2</sup> er den udgående, langbølgede stråling fra Jordens overflade.

Figur 1 viser energistrømmene på Jorden [10]. Netto-solindstrålingen  $S$  er givet ved

$$S = \frac{S_0}{4} \cdot (1 - \alpha) = 239 \text{ W/m}^2, \quad (1)$$

hvor  $S_0$  er solkonstanten (1364 W/m<sup>2</sup>) og  $\alpha$  er albedo-effekten (0,30), der angiver den del af solindstrålingen, som reflekteres af Jorden og atmosfæren. Jorden kan tilnærmelsesvis betragtes som et sort legeme med en udstråling  $R_{jord} = \sigma T^4$ , hvor  $T$  er Jordens overfladetemperatur og  $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^4$  er Stefan-Boltzmanns konstant.

Af denne varmestråling er det kun brøkdelen  $\epsilon$ , som passerer Jordens atmosfære, således at udstrålingen i toppen af atmosfæren er  $R = \epsilon\sigma T^4$ . Ifølge strålingsligevægtsmodellen skal Jordens udsendelse af infrarød varmestråling  $R$  i toppen af atmosfæren være den samme som netto-solindstrålingen fra Solen, dvs.:

$$R = \epsilon\sigma T^4 = \frac{S_0}{4} \cdot (1 - \alpha) = 239 \text{ W/m}^2. \quad (2)$$

Med en gennemsnitstemperatur af Jorden på  $15^\circ\text{C}$  ( $T = 288 \text{ K}$ ) kan  $\epsilon$  beregnes til 0,62. Hvis Jorden ikke havde en atmosfære, ville  $\epsilon = 1$ , og Jordens overfladetemperatur ville være  $-18^\circ\text{C}$ .

Hvis  $\text{CO}_2$ -koncentrationen i atmosfæren stiger, vil absorptionen af infrarød stråling fra Jorden øges, og  $\epsilon$  vil blive mindre. For at strålingsligevægten kan opretholdes, må Jordens overfladetemperatur derfor øges med  $\Delta T$ . Ved at differentiere udtrykket (2) og antage at netto-solindstrålingen er konstant, kan den nødvendige temperaturstigning  $\Delta T$  beregnes:

$$\Delta R/\Delta T = 4\epsilon\sigma T^3 + \left(\frac{\Delta\epsilon}{\Delta T}\right)\sigma T^4 = 0 \quad (3)$$

Den infrarøde strålingseffekt pr.  $\text{m}^2$ , som  $\text{CO}_2$  isoleret set absorberer i atmosfæren og opvarmer kloden ekstra med, benævnes  $\text{CO}_2$ 's "radial forcing",  $RF$ . Øges  $\text{CO}_2$ -koncentrationen fra et niveau  $c_1$  til et højere  $c_2$ , øges  $RF$  med  $\Delta RF$ . Ved samme overfladetemperatur af Jorden  $T$  bliver udstrålingen i toppen af atmosfæren mindre og  $R_2 < R_1$

$$\Delta RF = R_1 - R_2 > 0 \quad (4)$$

Indsættes  $\Delta RF = -\Delta\epsilon\sigma T^4$  i (3), kan  $\Delta T$  beregnes af (5), hvor  $\lambda_0$  betegnes som standard klimafølsomhedsfaktoren  $\lambda_0 = \epsilon\sigma T^3$ . Med  $T = 288 \text{ K}$  fås  $\lambda_0 = 3,6 \text{ Wm}^{-2}$ ,

$$\Delta T = 4\Delta RF/\epsilon\sigma T^3 = \Delta RF/\lambda_0. \quad (5)$$

Vi ønsker at beregne  $\Delta T$  ved en fordobling af  $\text{CO}_2$ -koncentrationen i atmosfæren, fra de nuværende 400 ppm til 800 ppm. Dette gøres ved at beregne udstrålingen i toppen af atmosfæren,  $R_1$  og  $R_2$ , i det bølglængdeinterval (14–15  $\mu\text{m}$ ), hvor  $\text{CO}_2$  absorberer og herigennem bestemme  $\Delta RF$ .

Plancks strålingslov udtrykker den strålingsintensitet  $B(\tilde{\nu}, T)$ , der udsendes af et sort legeme med overfladetemperaturen  $T$  som funktion af den elektromagnetiske strålings bølgetal  $\tilde{\nu} = 1/\lambda$  i  $\text{cm}^{-1}$ .

$$B(\tilde{\nu}, T) = 2hc^2 \cdot \tilde{\nu}^3 \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc\tilde{\nu}}{k_b T}} - 1} \quad (6)$$

Enheden er  $\text{W/m}^2/\text{cm}^{-1}$  pr. rumvinkelenhed. Den monokromatiske stråling  $R(\tilde{\nu})$ , som passerer gennem atmosfæren med bølgetallet  $\tilde{\nu}$ , er givet ved (7) [11].

$$R(\tilde{\nu}) = \int_0^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T) \cdot e^{-\tau} d\tau \quad (7)$$

Her betegner  $\tau$  den optiske dybde, der angiver, hvor meget af strålingen  $I_0$ , som absorberes ved passage af en given luftsøjle og er ækvivalent til absorptionskoefficienten  $A$ , i Lambert-Beers lov

$$\tau = \ln\left(\frac{I_0}{I}\right) = A \cdot \ln(10) \quad (8)$$

Den optiske dybde for en foton med bølgetallet  $\tilde{\nu}$ , som udsendes fra højden  $z$  fra jordoverfladen og skal passere atmosfæren og videre ud i verdensrummet, er givet ved følgende udtryk

$$\tau_{\tilde{\nu}} = \int_z^\infty c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu}) \cdot dz = \epsilon'(\tilde{\nu}) \cdot \int_z^\infty c(z) dz \quad (9)$$

Her er  $c(z)$  koncentrationen af  $\text{CO}_2$  i højden  $z$  fra jordoverfladen, og  $\epsilon'(\tilde{\nu})$  er absorptionskoefficienten for  $\text{CO}_2$ ,  $\epsilon'(\tilde{\nu})$  ganget med  $\ln(10)$ , som antages at være uafhængig af højden fra jordoverfladen. Integralet i (9) angiver, hvor mange  $\text{CO}_2$ -molekyler, der er i luftsøjlen fra højden  $z$  og til atmosfærens top.  $c(z)$  er proportional med partialtrykket af  $\text{CO}_2$  i højden  $z$ , som med god tilnærmelse kan udtrykkes som [14]

$$p(z) = p_0 \cdot e^{\left(-\frac{gzM}{T_0 R_0}\right)} \quad (10)$$

Her er  $p_0$  trykket ved jordoverfladen,  $g$  er tyngdeaccelerationen ( $9,82 \text{ m/s}^2$ ),  $z$  er højden i m fra jordoverfladen,  $M$  er den molære masse for  $\text{CO}_2$  (44 g/mol),  $T_0$  er overfladetemperaturen (288 K) og  $R_0$  er gaskonstanten ( $8,31 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$ ). For at gøre udtrykket mere enkelt indføres konstanten  $a$

$$a = g \cdot \frac{M}{T_0 \cdot R_0} = 1,8 \cdot 10^{-4} \text{ m}^{-1}. \quad (11)$$

Derudover erstattes partialtrykket med koncentrationen  $c$ , så udtrykket nu ser således ud:

$$c(z) = c_0 \cdot e^{-a \cdot z}. \quad (12)$$

Nu kan  $c(z)$  substitueres ind i ligning (9). Løsningen af integralet i (13) giver udtrykket (14) for den optiske dybde for en foton med bølgetallet  $\tilde{\nu}$ , som udsendes fra højden  $z$  i atmosfæren

$$\tau_{\tilde{\nu}} = c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu}) \int_z^\infty e^{-a \cdot z} \cdot dz \quad (13)$$

$$\tau_{\tilde{\nu}} = \frac{c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu})}{a} \cdot e^{-a \cdot z}. \quad (14)$$

Det ses, at ved højden  $z = 0$  vil  $e^{-a \cdot z}$  give 1, så udtrykket for den optiske dybde ved jordoverfladen,  $\tau(s)$ , kan skrives:

$$\tau(s) = \frac{c(z) \cdot \epsilon'(\tilde{\nu})}{a}. \quad (15)$$

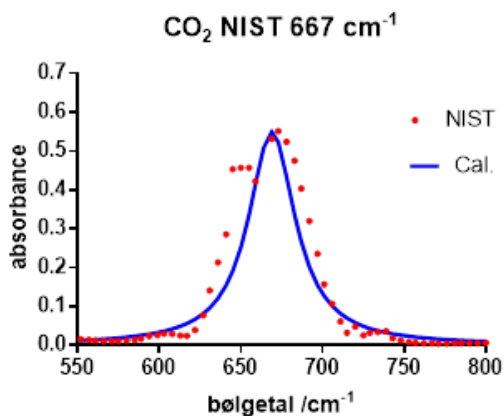
Nu kan det endelige udtryk for alle optiske dybder opstilles:

$$\tau = \tau(s) \cdot e^{-a \cdot z}. \quad (16)$$

## Metode

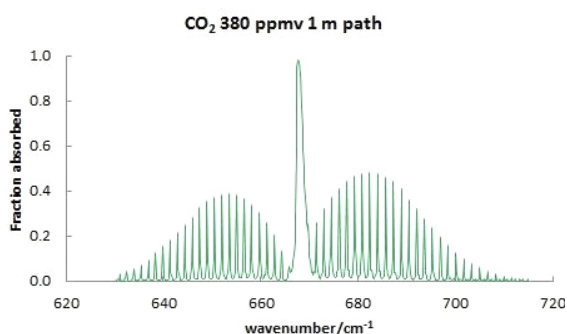
CO<sub>2</sub> har fire vibrationsbånd, hvor ↓O-C-O↓-bøjningsbåndet omkring 667 cm<sup>-1</sup> (15 μm) er langt det vigtigste i drivhusgasvirkningen af CO<sub>2</sub>. Figur 2 viser et lavresolutions-infrarødt spektrum (IR) af en CO<sub>2</sub>-gasprøve optaget af National Institute of Standards (NIST) [12]. En typisk absorptionstop i IR kan beskrives ved et Lorentzudtryk, hvor  $\tilde{\nu}$  er bølgetallet,  $\tilde{\nu}_{667}$  og  $A_{667}$  er henholdsvis bølgetallet og absorptionsen ved topmaksimum, og  $w$  er halvværdibredden i cm<sup>-1</sup>. I figur 2 er NIST-spektret simuleret med  $w = 35$  cm<sup>-1</sup>. Ud fra NIST-spektret kan man beregne en absorptionskoefficient ved 667 cm<sup>-1</sup> på  $\epsilon_{667} = 2,1 \cdot 10^{-5}$  ppm<sup>-1</sup>m<sup>-1</sup>. I en atmosfære med 400 ppm CO<sub>2</sub> vil 99 % af 667 cm<sup>-1</sup>-fotonerne udsendt fra Jorden være absorberet efter blot 240 m.

$$A = A_{667} \cdot \frac{w^2}{4 \cdot (\tilde{\nu} - \tilde{\nu}_{667}) + w^2} \quad (17)$$



**Figur 2.** Kurver, der viser den eksperimentelle absorptionsmåling af CO<sub>2</sub> (røde punkter) og en simuleret kurve (blå). Spektret er optaget af en CO<sub>2</sub>-gasprøve med partialtrykket pCO<sub>2</sub> = 200 mmHg og pCO<sub>2</sub>+pN<sub>2</sub> = 600 mmHg og en optisk vejlængde på 0,1 m.

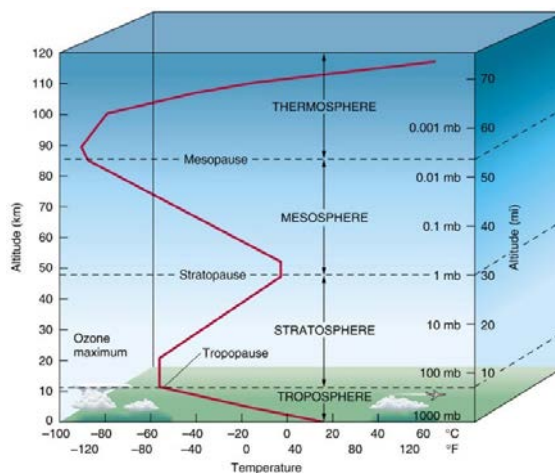
I kommende udregninger er en  $w$ -værdi på 17 cm<sup>-1</sup> blevet valgt, da dette svarer til halvdelen af den fundne. Et højt opløsende IR-spektrum af CO<sub>2</sub> er vist i figur 3. Her ses bøjningsbåndet overlejret af mange rotationsovergange i CO<sub>2</sub>-molekylet. Der ses "huller" i det højt opløsende spektrum sammenlignet med NIST-spektret.



**Figur 3.** Højt opløsende IR-spektrum af CO<sub>2</sub> med alle dets individuelle rotationsovergange [13].

Figur 4 viser temperaturen op gennem atmosfæren. Op gennem troposfæren (0–10 km) falder temperaturen fra ca. 288 K til 220 K, hvorefter temperaturen i stratosfærelaget fra 10–20 km er konstant 220 K. Vi har valgt at medtage de første 20 km af atmosfæren og opdele troposfæren i 10 lag af tykkelse på 1 km. Hvert atmosfærelag antages at kunne beskrives som et sort legeme, der udsender lys givet ved lagets temperatur  $T_z$ ,

$$T_z = 288 - 7 \cdot z. \quad (18)$$



**Figur 4.** Atmosfærens temperatur og tryk som funktion af højden  $z$  fra jordoverfladen [14].

Vi kan nu beregne integralet for den monokromatiske strålings flux  $R(\tilde{\nu})$  i (7) ved at opdele atmosfæren i tropospausen og stratosfæren, som vi antager har en konstant temperatur  $T = 220$  K (18). Dette er ikke helt korrekt, men over 20 km er atmosfæren meget tynd og betyder relativt lidt.

$$\begin{aligned} R(\tilde{\nu}) &= \int_0^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T) \cdot e^{-\tau} d\tau \quad (19) \\ &= \int_{\tau_{10}}^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T(\tau)) \cdot e^{-\tau} d\tau \\ &\quad + \int_0^{\tau_{10}} B(\tilde{\nu}, 220) \cdot e^{-\tau} d\tau. \end{aligned}$$

$$\int_{\tau_{10}}^{\tau_s} B(\tilde{\nu}, T(\tau)) \cdot e^{-\tau} d\tau = \sum_{i=1}^{10} B(\tilde{\nu}, T_i) \cdot e^{-\tau_i} \cdot w_i d\tau. \quad (20)$$

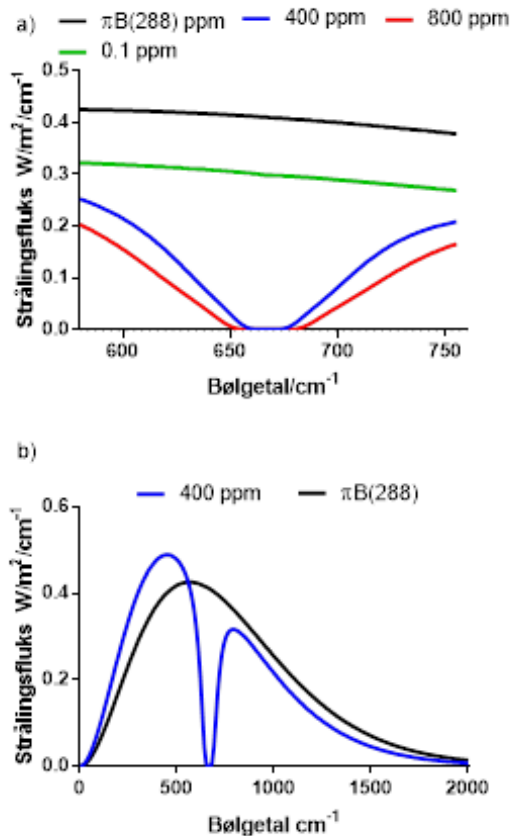
$$w_i = \frac{\tau(i) - \tau(i+1)}{\tau(s) - \tau(10)}. \quad (21)$$

$$\begin{aligned} &\int_0^{\tau_{10}} B(\tilde{\nu}, 220) \cdot e^{-\tau} d\tau \quad (22) \\ &= B(\tilde{\nu}, 220) \cdot \int_0^{\tau_{10}} e^{-\tau} d\tau \\ &= B(\tilde{\nu}, 220) \cdot (1 - e^{-\tau}). \end{aligned}$$

Integralet fra 10 km til uendeligt langt væk, hvor den optiske dybde er tilsvarende 0, kan løses analytisk (22). Integralet fra jordoverfladen ( $\tau_s$ ) til 10 km ( $\tau_{10}$ ) foretages som en sum af bidragene fra de 10 atmosfærelag.



De enkelte bidrag multipliceres med en vægtfaktor  $w_i$ , der angiver det  $i$ 'te atmosfærelags relative andel af troposfærens optiske dybde ( $\tau_s - \tau_{10}$ ). Det skal bemærkes, at alle udtrykkene for  $R$  skal multipliceres med faktoren  $\pi$  for at tage hensyn til, at strålingen udsendes i alle retninger i en halvkugle. I studenterprojektet blev  $R(\tilde{\nu})$ -værdierne beregnet i et Excel-regneark for hver  $\text{cm}^{-1}$  i bølgetalsintervallet  $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$ , svarende til  $\text{CO}_2$ -båndets omtrentlige udstrækning [5]. I beregningerne blev både  $\text{CO}_2$ -absorptionsbåndets linjebredde  $w$  samt atmosfærens  $\text{CO}_2$ -indhold i ppm varieret.



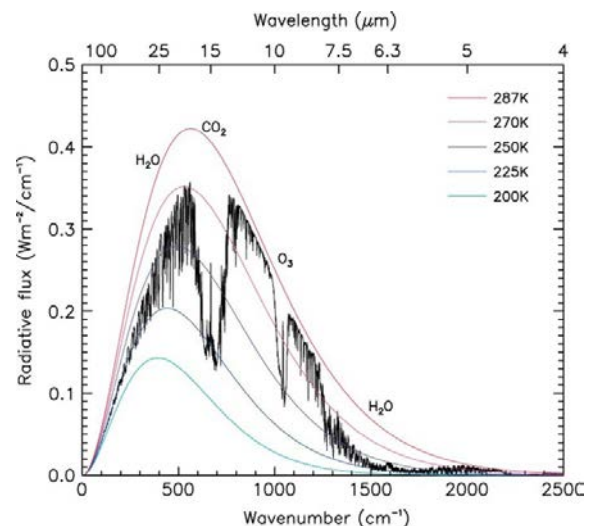
**Figur 5.** Strålingsemissionen fra toppen af atmosfæren  $R(\tilde{\nu})$  beregnet med den simple atmosfærelagsmodells forskellige  $\text{CO}_2$ -koncentrationer.

## Resultater og diskussion

Figur 5a viser de beregnede infrarøde strålingsflukser  $R(\tilde{\nu})$  i bølgetalsintervallet  $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$  for en 0,1, 400 og 800 ppm  $\text{CO}_2$ -atmosfære. Dyk i  $R(\tilde{\nu})$  omkring  $\text{CO}_2$ -absorptionsbåndets center ved  $667\text{ cm}^{-1}$  ses tydeligt. Omkring centerbåndet er der ingen infrarøde fotoner, som slipper igennem atmosfæren, og først omkring  $30\text{--}40\text{ cm}^{-1}$  fra centertoppens maksimum slipper strålingen for alvor igennem. Det er her, hvor forskellen på 400 og 800 ppm-kurverne for alvor viser sig og giver anledning til en øget opvarmning af Jorden med værdien  $\Delta RF$ . Figur 6 viser state of the art beregninger af  $R(\tilde{\nu})$  fortaget af Zhong og Haigh [10]. Reduktionen i udstråling ved  $667\text{ cm}^{-1}$ , den såkaldte radiative forcing  $RF$  af  $\text{CO}_2$ , er i artiklen opgivet til  $16\text{ W/m}^2$  ved 389 ppm. I vores simple model beregnes  $RF$  ved 400 ppm til henholdsvis 23 og  $31\text{ W/m}^2$  for  $\text{CO}_2$ -linjebredderne

10 og  $17\text{ cm}^{-1}$  (se tabel 1). I figur 6 ses det, at der faktisk slipper centerfotoner igennem atmosfæren et sted oppe i stratosfæren ved en temperatur  $T = 220\text{ K}$ , hvilket der ikke gør i vores meget simple model. I figur 5a er indtegnet  $R(\tilde{\nu}) = \pi B(\tilde{\nu}, 288)$ , som er udstrålingen uden atmosfære. Denne kurve ligger samlet set  $3\text{ W/m}^2$  over udstrålingen beregnet med en meget lav  $\text{CO}_2$ -koncentration (0,1 ppm). Resultaterne af de simple modelberegninger er vist i tabel 1.  $R$ -værdierne afhænger af den valgte linjebredde  $w$ , mens  $\Delta RF$  er relativt ufølsom overfor ændringer i  $w$ . Selv om beregningerne har svært ved at reproducere den korrekte  $RF$ -værdi ved 400 ppm, som kan beregnes ved avancerede beregninger [10] eller bestemmes via satellitmålinger [15], viser tallene den korrekte logaritmiske lineære sammenhæng, som vist i figur 7. Denne intuitivt overraskende sammenhæng viser, at  $\Delta RF$  og dermed den globale temperaturstigning er ens, uanset om atmosfærens  $\text{CO}_2$ -indhold øges fra 400 til 800 ppm eller fra 800 til 1600 ppm. Vores beregninger giver følgende sammenhæng, hvor  $c_1$  og  $c_2$  angiver  $\text{CO}_2$ -koncentration i atmosfæren.

$$\Delta RF = 9,9 \cdot \ln\left(\frac{c_2}{c_1}\right) \text{ W/m}^2. \quad (23)$$



**Figur 6.** Den sorte kurve er et model-genereret spektrum af strålingsfluksen udsendt til rummet i toppen af atmosfæren. De røde kurver angiver sortlegeme-udstrålingen ved de angivne temperaturer [10].

Ved en fordobling af  $\text{CO}_2$ -indholdet i atmosfæren kan  $\Delta RF$  beregnes til  $6,9\text{ W/m}^2$ . Denne værdi kan ifølge (5) omregnes til en global temperaturstigning på  $\Delta T = 6,9/\lambda_0 = 6,9/3,6 = 1,9\text{ K}$ . Faktoren 9,9 i udtrykket (22) er noget højere end de 5,35, som er bestemt af Myhre m.fl. i 1998 [16], og som giver en  $\Delta RF = 3,7\text{ W/m}^2$  og en global temperaturstigning på  $1,0^\circ\text{C}$ , isoleret set. Vores  $\Delta RF$  er således omtrentlig en faktor 2 for høj og beror på, at det lavt opløste NIST IR-spektrum (figur 2) ikke er tilstrækkeligt godt til at kunne foretage en præcis beregning. I det højtopløsende spektrum er der små bølgetals-“huller”, som tillader fotoner at passere

Tabel 1. Modelberegning af  $R$ ,  $RF$  og  $\Delta RF$  i bølgetalsintervallet  $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$  som funktion af  $[\text{CO}_2]$  og  $\text{CO}_2$ -IR-top-linjebredden  $w$ .

[CO <sub>2</sub> ]/ppm	$w = 10\text{ cm}^{-1}$			$w = 17\text{ cm}^{-1}$		
	$R/\text{W/m}^2$	$RF^a/\text{W/m}^2$	$\Delta RF^b/\text{W/m}^2$	$R/\text{W/m}^2$	$RF^a/\text{W/m}^2$	$\Delta RF^b/\text{W/m}^2$
$\pi \cdot B(288)^a$	56,4	-	-	56,4	-	-
0,1	53,6	0	-	53,6	0	-
100	42,6	10,9	-	36,2	17,3	-
200	38,2	15,4	4,5	29,8	23,7	6,4
400	32,6	20,9	5,5	22,7	30,9	7,2
800	26,1	27,5	6,5	15,4	38,1	7,2
1600	18,9	34,6	7,1	9,2	44,4	6,3

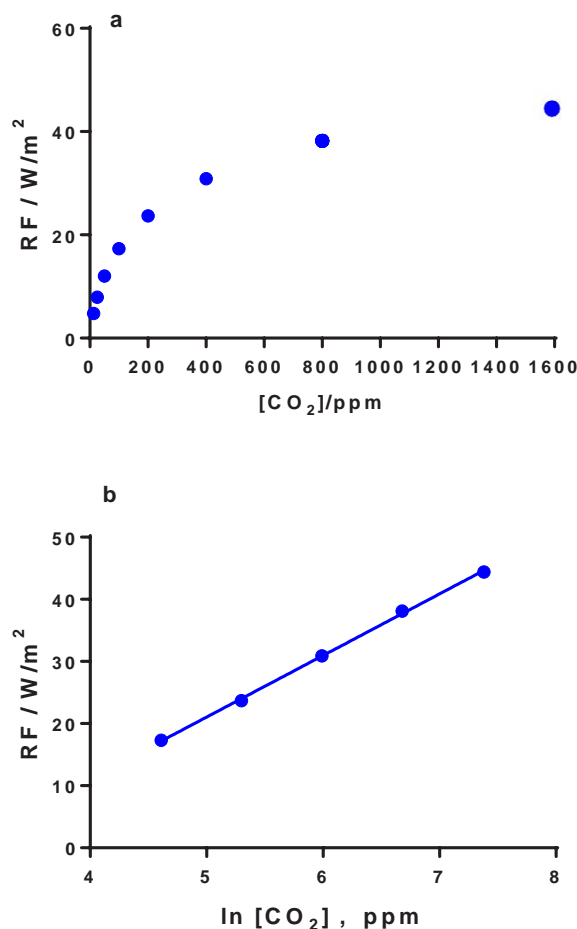
<sup>a</sup> $RF = R - R(0,1)$  <sup>b</sup> $\Delta RF = R_1 - R_2$  beregnet for forskellene i  $R$  for 100–200, 200–400, 400–800 og 800–1600 ppm.

uhindret gennem atmosfæren. Hvis vi antager, at halvdelen af de infrarøde fotoner i bølgelængdeintervallet  $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$  kan finde vej gennem "hullerne", ja så vil  $\Delta RF$  halveres. I princippet kunne vores regnearksmetode benyttes for hvert skarpe bånd i figur 3 – men i praksis er det ikke muligt, og mere avanceret programmering er nødvendig, for at behandle det langt mere komplekse figur 3-spektrum. IPCC har i deres seneste rapport estimeret en global middeltemperaturstigning fra  $1,5\text{--}4,5^\circ\text{C}$  ved en fordobling af  $\text{CO}_2$ -koncentrationen fra 400–800 ppm, som er væsentlig højere end de  $1^\circ\text{C}$ , som beregnes som den isolerede effekt af  $\text{CO}_2$ . Årsagen er, at en stigning af landjordens og havenes temperatur som følge af  $\text{CO}_2$ -øgningen vil give afledte effekter såsom øget fordampning af drivhusgasen vand fra verdenshavene, afsmeltning af polerne og reduktion i albedoeffekten, optøning af permafrosten med udledning af metan til følge m.m. Det vanskelige er således ikke at estimere effekten isoleret set af en  $\text{CO}_2$ -koncentrationsøgning, men at kunne beregne og forudsige alle de afledte sideeffekter. IPCC opererer med en klimafølsomhedsfaktor, som er betydelig lavere end standard klimafølsomhedsfaktoren på  $\lambda_0 = 3,6\text{ W/m}^2$ . De nyeste videnskabelige undersøgelser viser, at klimafølsomheden øges ved stigende global middeltemperatur [9].

### Konklusion

I artiklen opstilles en simpel model til beskrivelse af drivhusgassen  $\text{CO}_2$ 's indflydelse på Jordens middeltemperatur. Den simple model benytter fysik og matematik, som ligger inden for højniveaupensum for de to fag i gymnasiet. Modellen er baseret på strålingsligevægtsmodellen og med en opdeling af atmosfærens første 10 km (troposfæren) i lag på 1 km og konstant temperatur for stratosfæren på  $220\text{ K}$ . Alle beregninger er udført i regneark. I det infrarøde bølgetalsområde  $578\text{--}778\text{ cm}^{-1}$ , hvor  $\text{CO}_2$  har sin væsentligste drivhusgasabsorption, beregnes en absorption af infrarød stråling (radiative forcing,  $RF$ ) på  $31\text{ W/m}^2$  for en  $\text{CO}_2$ -koncentration på 400 ppm, hvor satellitmålinger giver  $16\text{ W/m}^2$ . Ved en fordobling af  $\text{CO}_2$ -koncentrationen til 800 ppm forudsiger modellen en forøget absorption  $\Delta RF$  på  $6,9\text{ W/m}^2$ , som kan omregnes til en global middeltemperaturstigning på  $1,9^\circ\text{C}$  for den isolerede

virkning af  $\text{CO}_2$ . Selv om den simple model overestimerer både  $R$  og  $\Delta RF$  med ca. en faktor 2 i forhold til mere avancerede beregninger, beskriver modellen fint den logaritmiske lineære sammenhæng mellem  $RF$  og  $\text{CO}_2$ -koncentrationen i atmosfæren og viser, hvorledes emissionen af infrarød stråling  $30\text{--}40\text{ cm}^{-1}$  fra centerabsorptionen ( $667\text{ cm}^{-1}$ ) reduceres ved en fordobling af  $\text{CO}_2$ -koncentrationen. Modellen kan således klart afvise  $\text{CO}_2$ -hypotese-skeptikernes argument om, at atmosfæren allerede er mættet med  $\text{CO}_2$ , og at en øget  $\text{CO}_2$ -koncentration ikke vil påvirke middeltemperaturen på Jorden.



Figur 7. Radiative forcing ( $RF$ ) beregnet ved den simple atmosfærelagsmodel som funktion af  $[\text{CO}_2]$  og  $\ln[\text{CO}_2]$ .

## Litteratur

- [1] O. Humlum (2010) Det ustyrlige klima. Eksperternes vej fra forskere til flagellant, 2. udgave, Trykkefrihedsselskabets Bibliotek.
- [2] J. Krüger (2016) Klimamyten. Et opgør med tidens CO<sub>2</sub>-panik, 1. udgave, People'sPress.
- [3] [www.skepticalscience.com/saturated-CO<sub>2</sub>-effect-intermediate.htm](http://www.skepticalscience.com/saturated-CO2-effect-intermediate.htm).
- [4] L.M. Jensen og H.B. Jensen (2020) Global opvarmning, Systime A/S.
- [5] V. Christensen m. fl. (2019) CO<sub>2</sub>'s indflydelse på Jordens gennemsnitstemperatur – en formidling af tallene bag klimadebatten, RUC.
- [6] J.U. Andersen (2010) Om klimamodeller og satellitmålinger, *Kvant*, bind 21, nr. 2, side 28–32.
- [7] J.H. Christensen (2015) Klimaforandringer set gennem FN's klimapanel 5. hovedrapport,” *Kvant*, bind 26, nr. 3, side 23–29.
- [8] J.O.P. Pedersen (2011) Solaktivitet og klimaforandringer, *Kvant*, bind 22, nr. 4, side 26–31.
- [9] J.O.P. Pedersen (2017) Drivhuseffekten, *Kvant*, bind 28, nr. 3, side 31–34.
- [10] W. Zhong og J. D. Haigh (2013) The greenhouse effect and carbon dioxide, *Weather*, bind 68, nr. 4, side 100–105.
- [11] Y. Huang og M. B. Shahabdi (2014) Why logarithmic? A note on the dependence of radiative forcing on gas concentration, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, bind 119, nr. 24, side 13.683–13.689.
- [12] NIST (2018) Carbon dioxide (online).
- [13] B. Bellamy, Barrett Bellamy Climate – Greenhouse gas spectra, <http://www.barrettbellamyclimate.com/page15.htm>.
- [14] [www.en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric\\_pressure](http://www.en.wikipedia.org/wiki/Atmospheric_pressure).
- [15] <http://clivebest.com/blog/?p=4597>.
- [16] G. Myhre, E.J. Highwood, K.P. Shine og F. Stordal (1988) New estimates of radiative forcing due to well mixed greenhouse gases, *Geophysical Research Letters*, bind 25, nr. 14, side 2715–2718.

## Nyt fra SNU

### H.C. Ørsted på ny – skønheden i naturen

Som omtalt i *Kvant* nr. 1 fra april 2020 har SNU skabt en vandrestilling i forbindelse med den nationale fejring af 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen.

Udstillingen har været i Rundetaarn fra 1. juli – 27. september i år og er nu vandret videre til Odense, hvor den åbnede hos Syddansk Universitetsbibliotek den 5. oktober. Det forventes, at udstillingen i Odense er åben for offentligheden mandag–fredag fra kl. 10–14.

I Rundetaarn har udstillingen været åben fra kl. 10–20 alle ugens syv dage, og der var alene i juli måned næsten 60.000 besøgende, fordelt på alle aldersklasser. I august–september måned har der været mange klassebesøg, fra alle klassetrin fra 4. klasse og opefter.



Fra venstre ses Dorte Olesen, Jens Breinegaard, Gregers Mogensen, Hans Buhl, Johannes Brøndsted og Peter Stauning.

Åbningen af udstillingen i Rundetaarn blev grundet COVID-19 holdt for 50 inviterede gæster den 1. juli og

50 andre den 2. juli, hvor videnskabsredaktør Jens Ramskov fra Ingeniøren fik overrakt H.C. Ørstedmedaljen i sølv i forbindelse med åbningen.

Ved begge åbninger takkede Dorte Olesen også Gregers Mogensen, Jens Breinegaard, Peter Stauning og Hans Buhl for deres indsats med at få udstillingen etableret. Som tak modtog de alle en vindmølle af strategi- og kommunikationsdirektør Johannes Brøndsted fra energiselskabet Ørsted A/S.



DTUs prorektor og formand for HCØ2020-styregruppen, Rasmus Larsen, lagde også vejen forbi Ørstedudstillingen på åbningsdagen.

### Generalforsamling

Den 21. september lykkedes det at holde den fra foråret udskudte generalforsamling i Auditorium 1 i H.C. Ørstedbygningen. Man kan se referatet på SNU's hjemmeside [www.naturlaeren.dk](http://www.naturlaeren.dk).

Det kan her kort nævnes, at kontingentet for 2021 er uændret, og at SNU i 2020 har en væsentligt forøget aktivitet grundet sin aktive deltagelse i fejringen af 200-året for H.C. Ørsteds opdagelse af elektromagnetismen. Endelig stillede Ole Mørk Lauridsen sit mandat til rådighed og blev genvalgt.