

**En kommentar til artiklen “How much has the Sun influenced Northern Hemisphere temperature trends? An ongoing debate” (2021) af Connolly et al.: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131>**

---

Hans Kjeldsen, Aarhus Universitet, [hans@phys.au.dk](mailto:hans@phys.au.dk) – 27. november 2021

*Artiklen af Connolly et al. (2021) indeholder en detaljeret analyse af Solens udstråling som viser, at Solen gennem de seneste 400 år har ændret sin udstråling. Hovedresultatet af analysen viser, at der er en lineær korrelation mellem TSI (Total Solar Irradiance) og den observerede temperaturvariation på Jordens overflade. Et problem ved analysen er dog, at det som udgangspunkt ikke er nok at finde en korrelation og bestemme størrelsen af korrelationskonstanten som indgår. For at skabe evidens for resultatet er det vigtigt at sikre, at størrelsen af korrelationen er fysisk funderet. Ser man på størrelsen af variationerne i TSI virker de umiddelbart mere end en størrelsesorden for små til at kunne bidrage væsentligt til den observerede temperaturstigning fra 1900 og frem til i dag. Derfor er det vanskeligt at se, at den fundne korrelationen kan udfordre IPCC's konklusioner. Hvis variationerne i TSI bidrager væsentligt til Jordens temperaturstigning, vil det derfor ikke kunne forklares som et resultat af direkte opvarmning. Det skal sandsynliggøres, at TSI via andre mekanismer end forøget energioptag kan påvirke temperaturen på Jorden med den korrekte størrelsesorden. På den baggrund deler jeg forfatterens opfattelse af, at man bør etablere en langt bedre forståelse af de mulige effekter fra Solen på Jordens temperatur, og at dette bør ske gennem videnskabelige studier af Solens egenskaber og de tidlige variationer.*

Artiklen af Connolly et al. (2021) - <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1674-4527/21/6/131> - indeholder en meget interessant gennemgang og diskussion af hvilken indflydelse Solen har på den globale temperatur på Jorden. Artiklen viser at Solen gennem de seneste 400 år har ændret sin udstråling og analysen viser at de tidlige ændringer er korreleret med den observerede stigning i Jordens middeltemperatur. Alene det faktum at der er korrelationer gør det naturligvis meget væsentligt at arbejde for en bedre indsigt i hvordan Solen påvirker Jordens atmosfære og temperaturen i atmosfæren.

Givet hvor grundig hele analysen i artiklen er og givet hvor stor en gruppe af forskere der har deltaget i arbejdet, finder jeg dog at det er overraskende, at et af de primære analyseresultater bygger på en lineær korrelation mellem TSI (Total Solar Irradiance) og den observerede temperaturvariation på Jordens overflade. Rent videnskabeligt er det normalt ikke nok at finde en korrelation og bestemme den lineære sammenhæng og korrelationskonstanten som indgår. Det er også vigtigt at sikre at der er evidens for at størrelsen af korrelationskonstanten er fysisk mulig og fysisk funderet. Det er her jeg ser det største problem i analysen. Variationerne i TSI er mere end en størrelsesorden for lille for at kunne bidrage væsentligt til den observerede temperaturstigning fra 1900 og frem til i dag og derfor mener jeg ikke at artiklens resultater umiddelbart vil udfordre IPCC's konklusioner.

En klimamodel for Jordens atmosfære er naturligvis kompleks og selv en lille variation i TSI kan være en indikator for at andre dele af Solens udstråling varierer væsentligt mere end den variation, som er observeret for TSI. Det kan f.eks. være forøget skydannelse gennem variationer i UV og kosmisk stråling som er korrelerede med TSI eller temperaturen i stratosfæren og den ydre atmosfære, som også er afhængig af solaktiviteten (og Solens cyklus). Det vides f.eks. at størrelsen af trykskalalhøjden (og temperaturen) i Jordens ydre atmosfære er afhængig af Solens udstråling (TSI og UV).

Hvis man ser bort fra drivhuseffekten og udelukkende ser på sammenhængen mellem ligevægtstemperaturen, TSI og Jordens albedo ( $A$ ) ved vi at ligevægtstemperaturen for Jorden ( $T_{eq}$ ) kan bestemmes som:

$$\sigma T_{eq}^4 = TSI \cdot (1 - A)$$

og derfor:

$$\frac{\delta T_{eq}}{T_{eq}} = \frac{\delta TSI}{4 \cdot TSI} - \frac{\delta A}{4 \cdot (1 - A)}$$

Hvis vi i første omgang ser bort fra ændringerne i albedoen ( $A$ ) vil en ændring i TSI forårsage en ændring i ligevægtstemperaturen som kan bestemmes som:

$$\delta T_{eq} = \frac{T_{eq}}{4 \cdot TSI} \cdot \delta TSI = \frac{0.047 \text{ K}}{\text{W m}^{-2}} \cdot \delta TSI$$

Som det fremgår i artiklen er ændringen i TSI fra 1900 til i dag maksimalt omkring  $2 \text{ W/m}^2$  og derfor vil man ikke forvente mere end en stigning på  $0.1 \text{ K}$  i ligevægtstemperaturen for Jorden fra 1900 til i dag, hvis vi anvender den simpleste model for sammenhængen mellem TSI og  $T_{eq}$ . Hvis TSI derfor bidrager væsentligt til den observerede temperaturstigning, må der være tale om en helt anden effekt end en simpel opvarmning af Jorden via optag af ekstra energi (gennem en forøgelse i TSI)

I ovenstående formel indgår også Jordens albedo ( $A$ ) – den såkaldte *bond albedo*. Jordens estimerede *bond albedo* er  $0.306$ . Desværre findes der (så vidt jeg ved) ingen gode målinger af Jordens *bond albedo* over tidsskalaer på flere hundrede år. Generelt vil afsmeltning af is ved polerne og på høje bjerge sænke albedoen, mens en forøget skydannelse vil forøge albedoen. Albedoen er også koblet til temperaturen og TSI, fordi isdannelse, afsmeltning og skydannelse generelt påvirkes af klimaet. Hvis man ser bort fra ændringerne i TSI og udelukkende ser på albedoen, gælder følgende sammenhæng mellem ændringen i ligevægtstemperaturen og ændringen i *bond albedo*:

$$\delta T_{eq} = -\frac{T_{eq}}{4 \cdot (1 - A)} \cdot \delta A = -92 \text{ K} \cdot \delta A$$

En temperaturstigning på 1.5 K kan derfor forekomme som et fald i albedoen på 0.016, så albedoen f.eks. går fra 0.306 til 0.290. Der er ingen tvivl om at mindre ændringer i albedoen finder sted og Solens udstråling, UV-stråling og påvirkning fra rumvejret (her såvel intensiteten som energien af de enkelte partikler) vil have betydning for bl.a. skydannelsen og dermed albedoen. Spørgsmålet er om en høj værdi for TSI (og høj solaktivitet) vil resultere i et lavere albedo (f.eks. mindre skydannelse) og om TSI ændringerne via den kobling, kan bidrage til Jordens temperaturstigning?

Ovenstående er på ingen måde nyt, men en analyse af Solens påvirkning af Jordens temperaturstigning bør efter min mening også se på de overordnede sammenhænge og gøre det klart om det er gennem disse mekanismer man forventer at se effekten fra ændringen i Solens TSI. Det mener jeg ikke er diskuteret i artiklen, hvor fokus er på den lineære korrelation og det er her jeg – som sagt – finder den største svaghed. Jeg deler forfatterens opfattelse af at man bør etablere en langt bedre forståelse af de mulige effekter fra Solen på Jordens temperatur og at dette bør ske gennem videnskabelige studier af Solens egenskaber og de tidlige variationer.

Et spørgsmål som også kunne undersøges i større detalje er Solens påvirkning af den energibalance som varmen i Jordens atmosfære har, hvor infrarød stråling spiller en afgørende rolle. Det er som bekendt den infrarøde tilbagestråling fra luften i Jordens atmosfære (i troposfæren) som forårsager drivhuseffekten, og i energibudgettet bidrager Solens direkte indstråling kun til ca. 35% af opvarmningen af Jordens overflade, mens 65% stammer fra den infrarøde tilbagestråling. Det er forskydningen i ligevægten mellem den infrarøde udstråling til verdensrummet og tilbagestrålingen fra atmosfæren, som i klimamodellerne (bl.a. fra IPCC) forårsager temperaturstigningen på Jordens overflade. En forøgelse i mængden af CO<sub>2</sub> (kuldioxid) og CH<sub>4</sub> (metan) i atmosfæren vil formindske størrelsen af den infrarøde udstråling højt i Jordens atmosfære, bl.a. fordi en forøget mængde af de pågældende gasarter forøger opaciteten for infrarødt lys ved en bølgelængde på mellem 13 µm og 17 µm. Temperaturen i den ydre del af troposfæren – hvor udstrålingen til verdensrummet finder sted – er 240 K og falder med højden op mod stratosfæren. Den forøgede opacitet fra stigningen i forekomsten af de nævnte gasarter betyder at den højde i atmosfæren hvor udstrålingen sker, vil vokse og derfor sker udstrålingen på et sted i atmosfæren, hvor temperaturen er endnu lavere. Dette sænker størrelsen af udstrålingen og herved forøges størrelsen af tilbagestrålingen som så forøger overfladetemperaturen.

I forhold til artiklen om Solens påvirkning af Jordens overfladetemperatur kunne det derfor også være relevant at se på hvilken indflydelse Solen har på temperaturen i den øverste del af troposfæren. Uafhængigt af mængden af CO<sub>2</sub> og CH<sub>4</sub> vil et fald i temperaturen i den ydre del af troposfæren – hvis Solen f.eks. kan forårsage dette – resultere i et fald i udstrålingen og dermed en forøgelse i tilbagestrålingen og dermed en stigning i overfladetemperaturen. En stigning i temperaturen i den ydre del af troposfæren vil på samme måde resultere i et fald i overflade-temperaturen. Ovenstående effekt er ikke diskuteret i artiklen om sammenhængen mellem TSI og overflade-temperaturen, men det er et eksempel på en af de effekter, som kunne inkluderes i studiet af Solens påvirkning på Jordens klima.