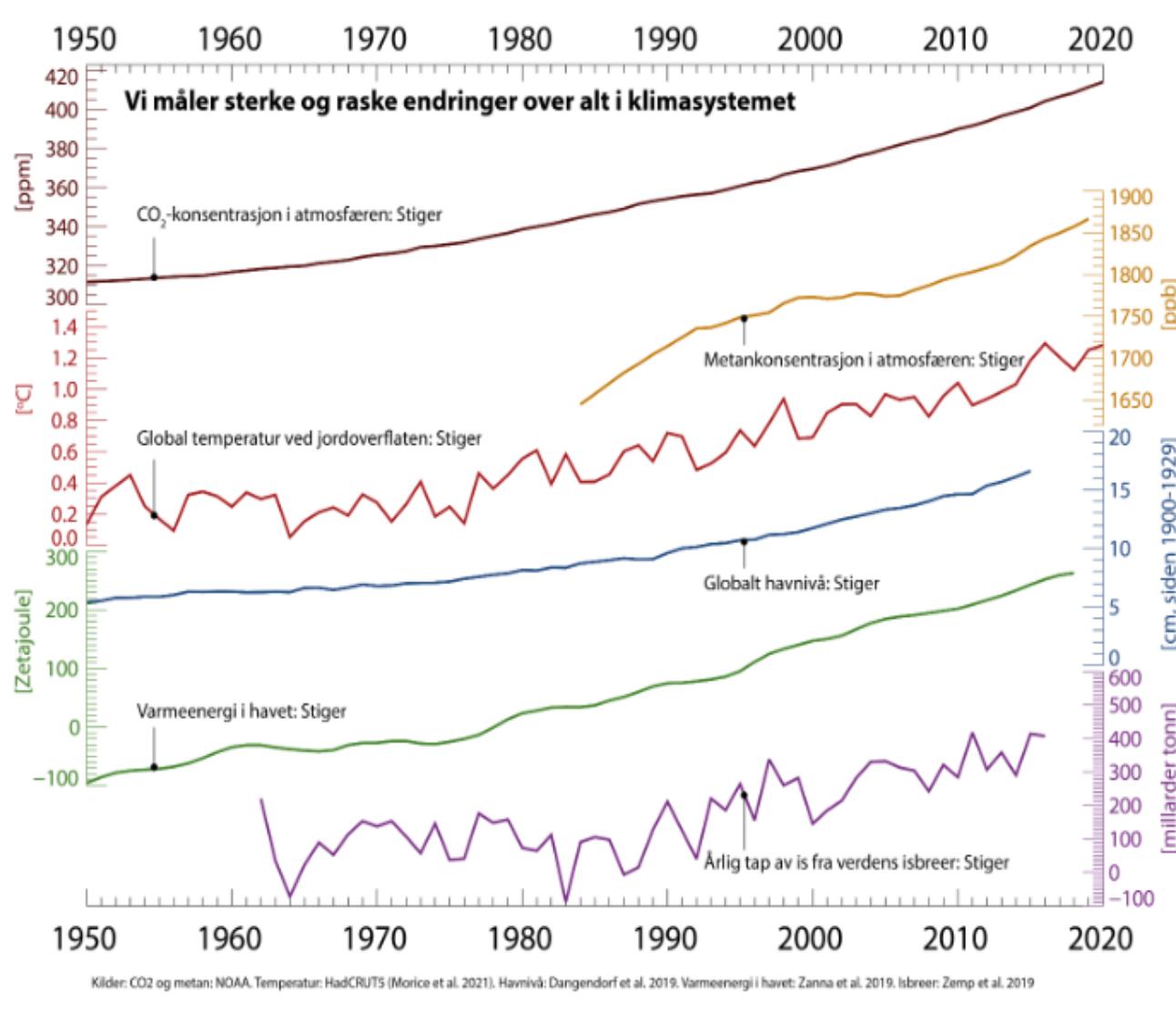


Mot 2067

Klimamodeller – til å stole på?

Bakteppe: Vi måler endringer over alt!

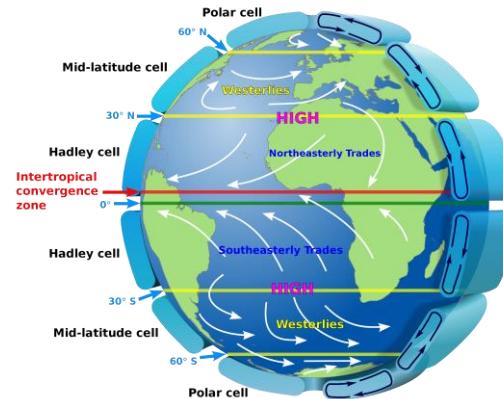


Hva er en klimamodell?

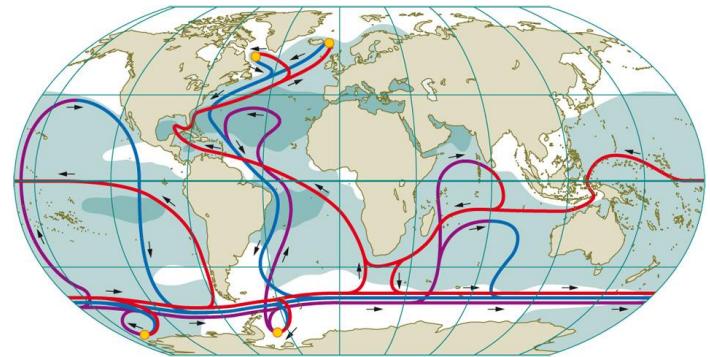
- Matematisk beskrivelse av fysiske prosesser i Jordens atmosfære og hav
- Prosessene er karakterisert ved
 - Vindhastighet
 - Lufttrykk
 - Fuktighet
 - Temperatur
 - Energi-innstråling/-utstråling
 - Friksjon
- Ligningene suppleres med *parameterisering*
 - Kompensere for prosesser som foregår inne i «pakkene»
- Ligningene suppleres med *scenarier*
 - Utslipp av klimagasser
 - Fotosyntese
 - Støvparkikler
 - mm

Betydningen av klimamodeller

- for å forstå – og kvantifisere – hvordan Klodens globale systemer (luft, hav, kretsløpene av vann, CO₂ etc.) fungerer
 - for å lage scenarier for hvordan fremtidens klima blir
 - for å kunne planlegge og iverksette tiltak
-
- *IPCC = Intergovernmental Panel on Climate Change*
 - *Assessment Reports*

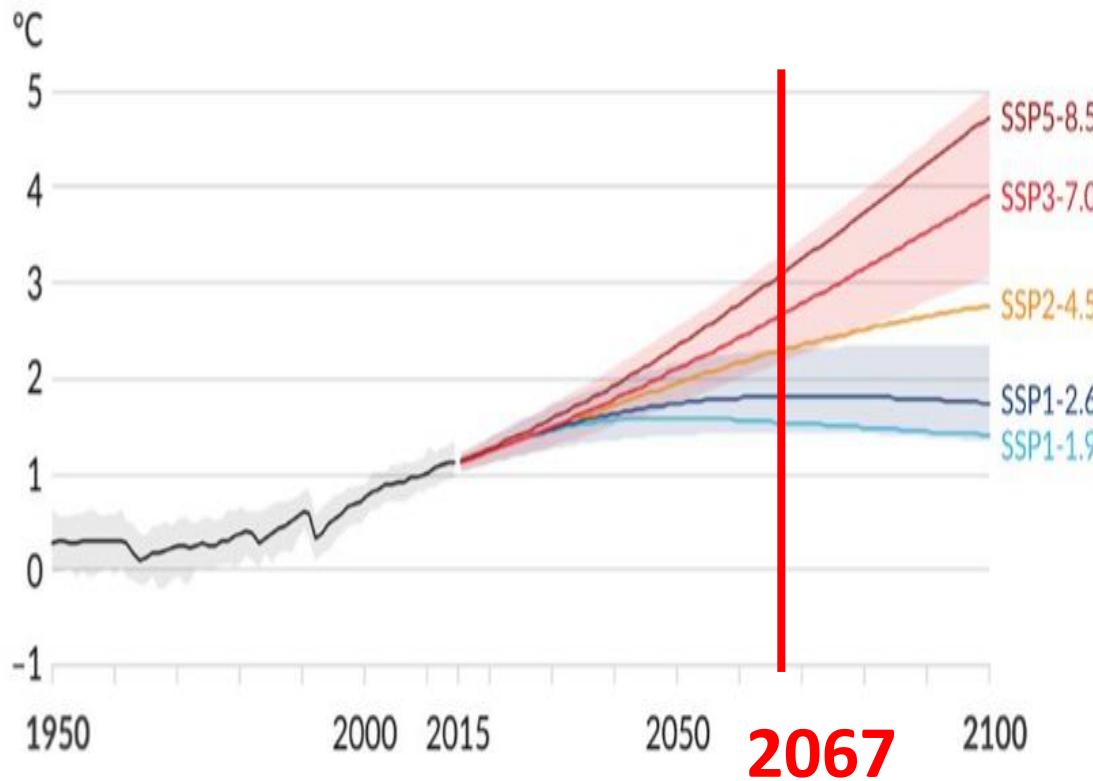


https://no.m.wikipedia.org/wiki/Fil:Earth_Global_Circulation_-en.svg



<https://worldoceanreview.com/en/wor-1/climate-system/great-ocean-currents/>

Mot 2067 – ulike CO₂-scenarier



SSP1: 1,5 °C +, og det kan antagelig holde seg rimelig levelig de fleste steder.

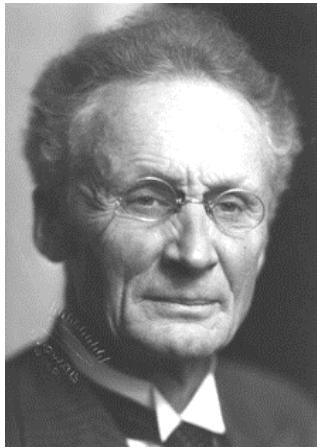
SSP2: Under 2 °C, og det kan kanskje gå noenlunde bra allikevel ... men det begynner å bli kritisk.

SSP3: Under 3 °C, og det ligger an til regionale konflikter ... noen vippepunkter slår inn.

SSP5: Over 3 °C pga. utslippene av CO₂ fortsetter uten stans ... innslag av vippepunkter gjør det ulevelig svært mange steder global krise.

Et tilbakeblikk – og en tur til Bergen

- 1917: Det Geofysiske Institutt opprettet
 - Det Meteorologiske Observatorium
- 1917: Prof. Vilhelm Bjerknes hentes fra Universitetet i Leipzig

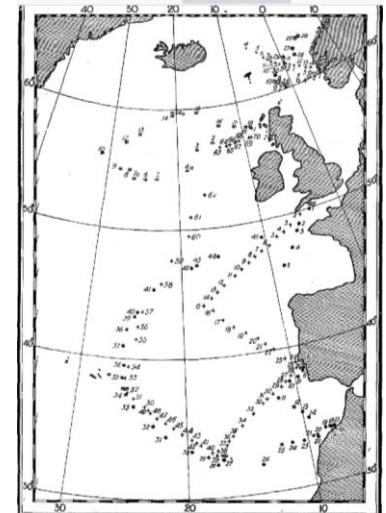


Vilhelm Bjerknes (1862 – 1951)



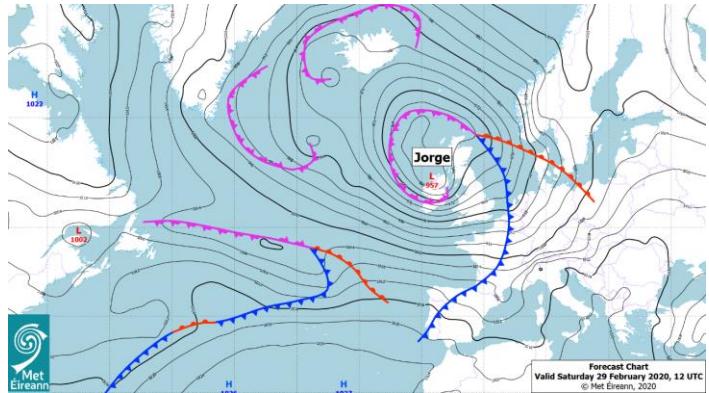
94. "Armauer Hansen" i Herdalsundet. Fotograf: ukjent

«Armauer Hansen»

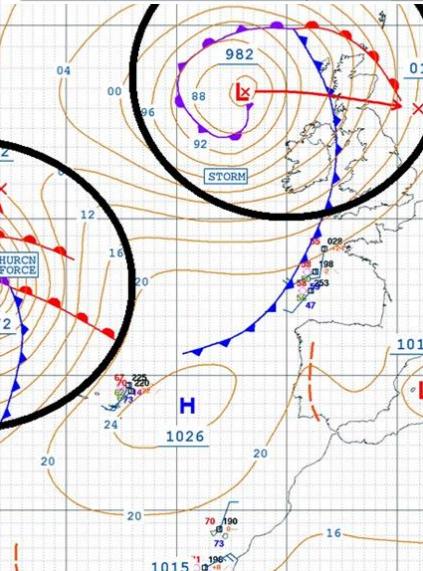
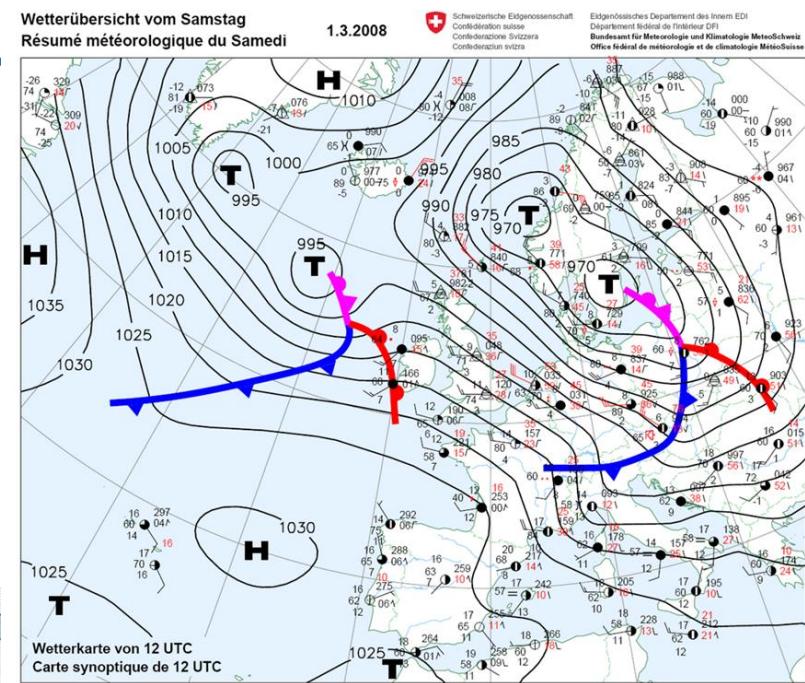
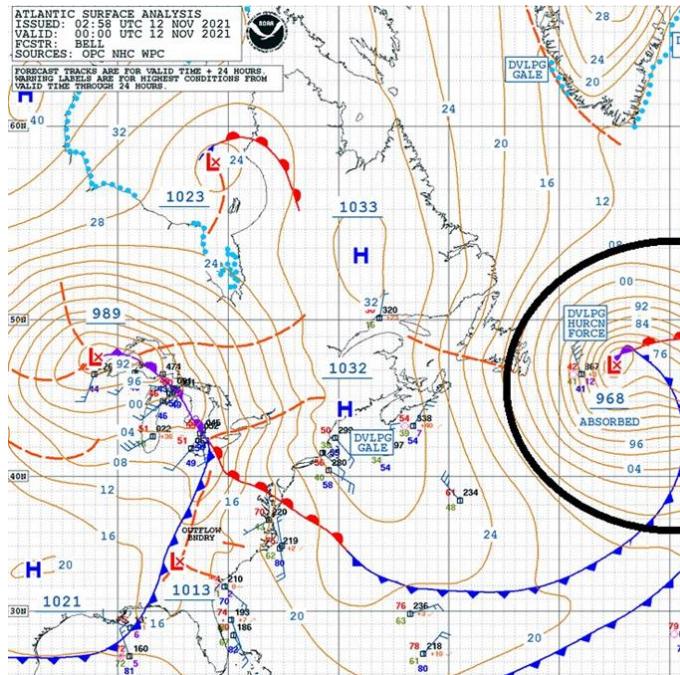


«Armauer Hansen» stasjoner 1913
1914 1922 1923 1924

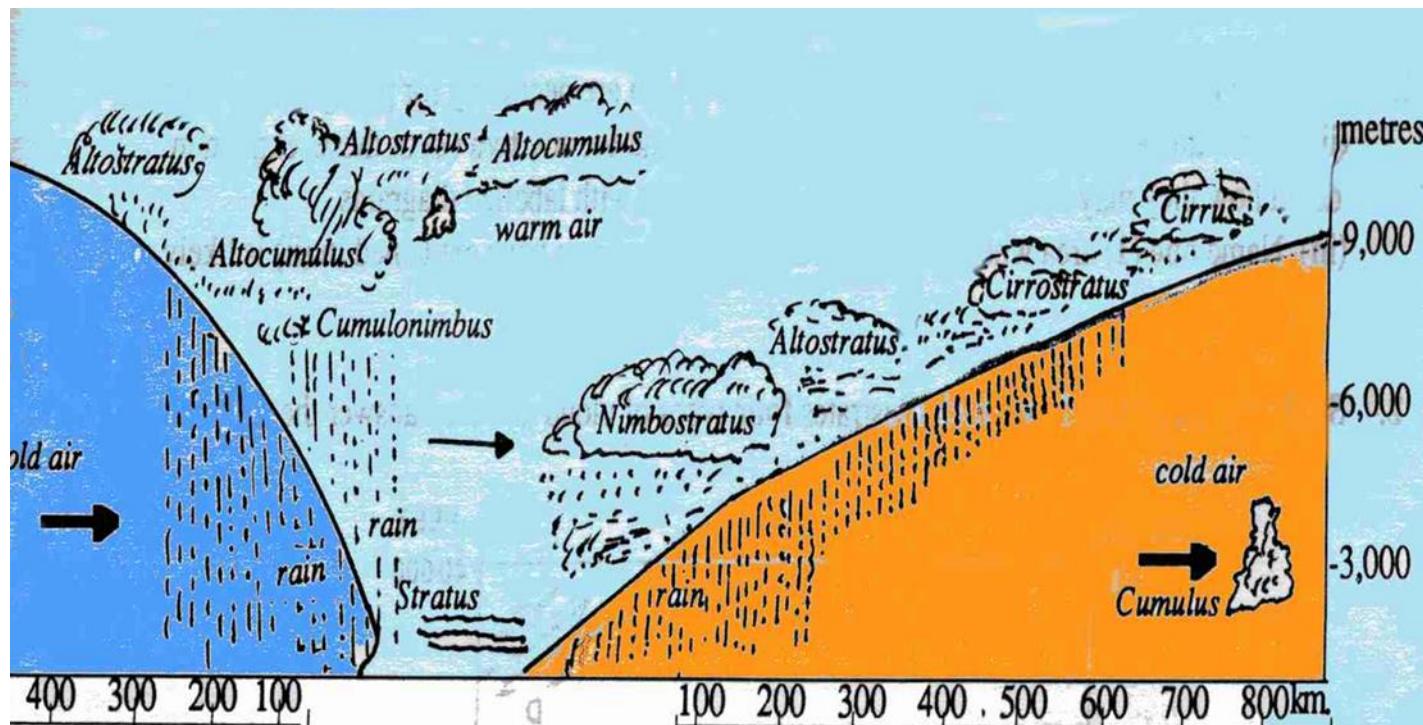
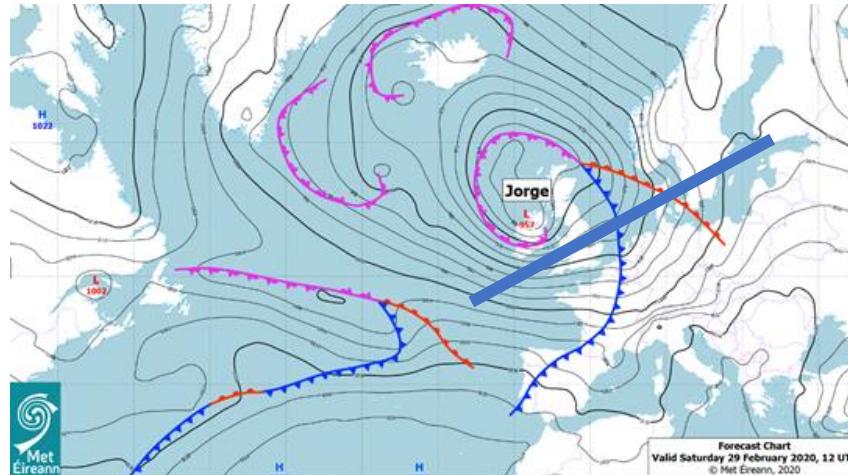
Varme og kalde fronter



<https://ife-global.uk/storm-jorge>



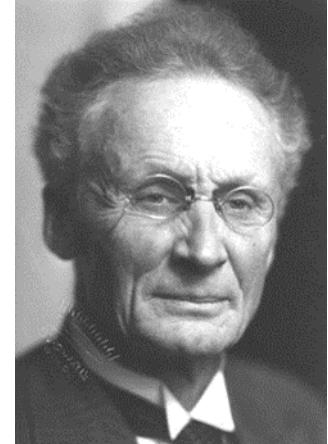
Tverrsnitt av en syklon



Vilhelm Bjerknes om numerisk værvarsling

https://no.wikipedia.org/wiki/Vilhelm_Bjerknes

«Dersom det er slik, som alle naturvitenskapelig tenkende mennesker tror, at *påfølgende tilstander i atmosfæren utvikles fra den foregående ifølge fysikkens lover*, da er det innlysende at den nødvendige og tilstrekkelige betingelse for en rasjonell løsning av problemet værvarsling er som følger:



1. Man må med tilstrekkelig nøyaktighet kjenne atmosfærrens tilstand ved et bestemt tidspunkt.
2. Man må med tilstrekkelig nøyaktighet kjenne lovene som styrer utviklingen av atmosfæren fra en tilstand til den neste.»

Das Problem der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkte der Mechanik und der Physik, Vilhelm Bjerknes 1904

Richardsson's værvarslingsfabrikk ca. 1915

- Baserte seg på Bjerknes' ligninger
 - Delte opp kartet fra 20. mai 1910 i ruter
 - 5 vertikale lag
 - Parametre: Lufttrykk og vind (moment)
 - Beregningstid: 6 uker
 - Resultat: Helt "på jordet" –
 - En årsak (av flere): Feil i startverdiene
 - *64 000 personer med mekaniske regnemaskiner*
-
- Alle meteorologiske prosesser i atmosfæren kan beskrives ved hjelp av syv parametre og seks differential-ligninger som beskriver den matematiske relation mellom disse parametre.
 - En matematisk løsning bestående av slike ikke-lineære differentialligninger er umulig.



<https://www.emetsoc.org/resources/rff/>



Lewis Fry Richardson (1881-1953)

Et gløtt inn i klimamodellens verden

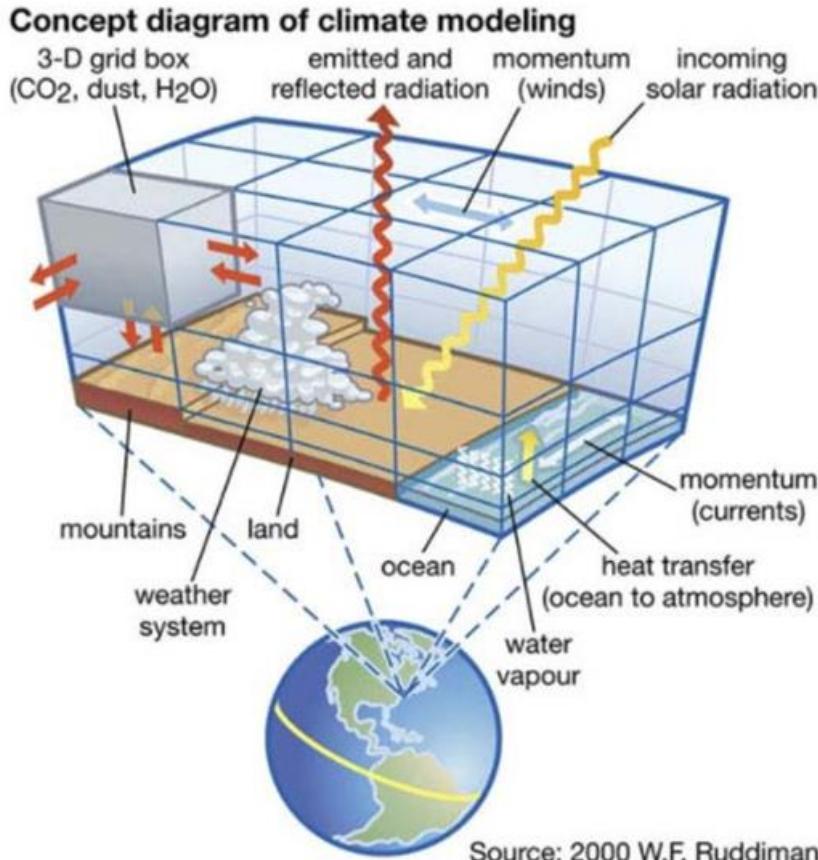


Figure 2. Schematic of a General Circulation Model (Source: [Climate Information](#).)

- Del Kloden inn i kuber
- Velg et punkt i hver kube
- Definere startverdiene
 - Lufttrykk
 - Temperatur
 - Vindretning
 - Vindhastighet
 - Fuktighet og tetthet
- Legg inn solenergi, CO₂ etc
- Beregn nye verdier fremover i tid

Et gløtt inn i klimamodellens verden

$$\frac{D\mathbf{u}}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \nabla p - 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{u} - \boldsymbol{\Omega} \times (\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) - g\mathbf{k} + friction \quad (1)$$

$$\frac{D\rho}{Dt} + \rho \nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (2)$$

$$c_p \frac{DT}{Dt} - \frac{1}{\rho} \left(\frac{Dp}{Dt} \right) = Q \quad (3)$$

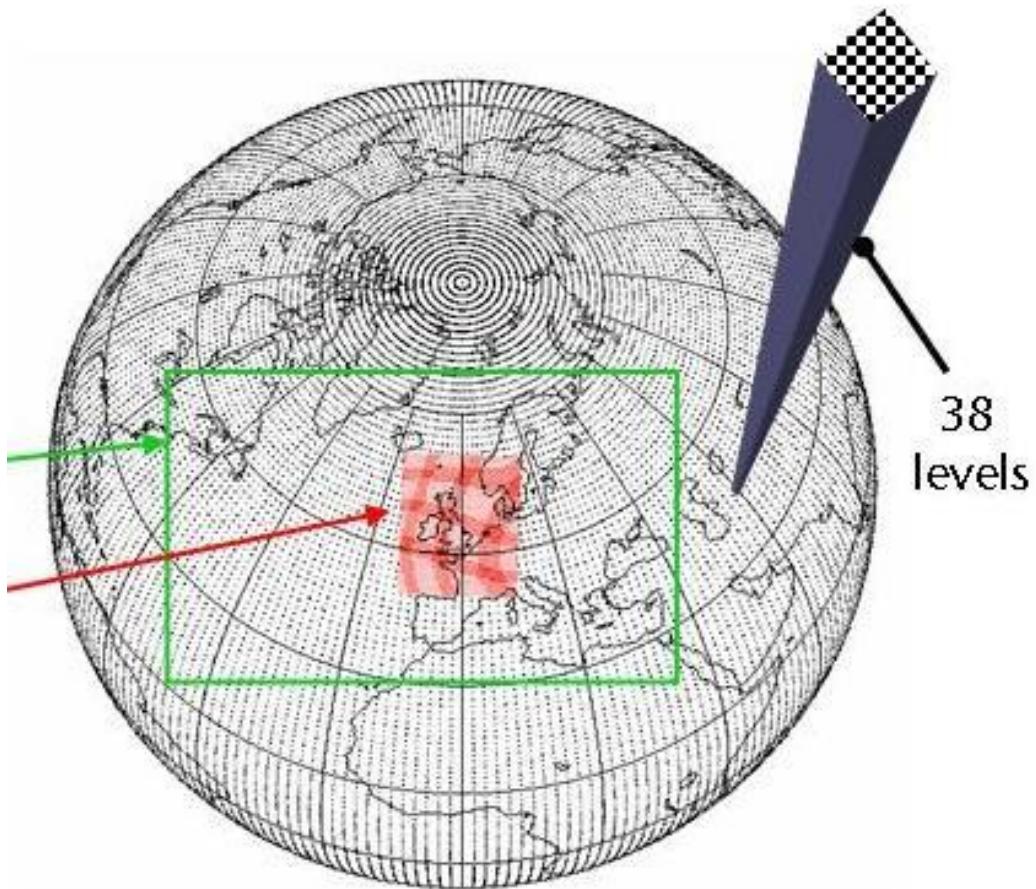
$$p = R_a T \rho \quad (4)$$

1. Navier-Stokes ligning for væsker i bevegelse
2. Kontinuitetsligning
3. Energiens bevarelse
4. Tilstandsningen

Ligningene kan bare løses numerisk
Iterative metoder

- Newton–Raphson method
- Eulers metode
- Runge-Kutta-metoden

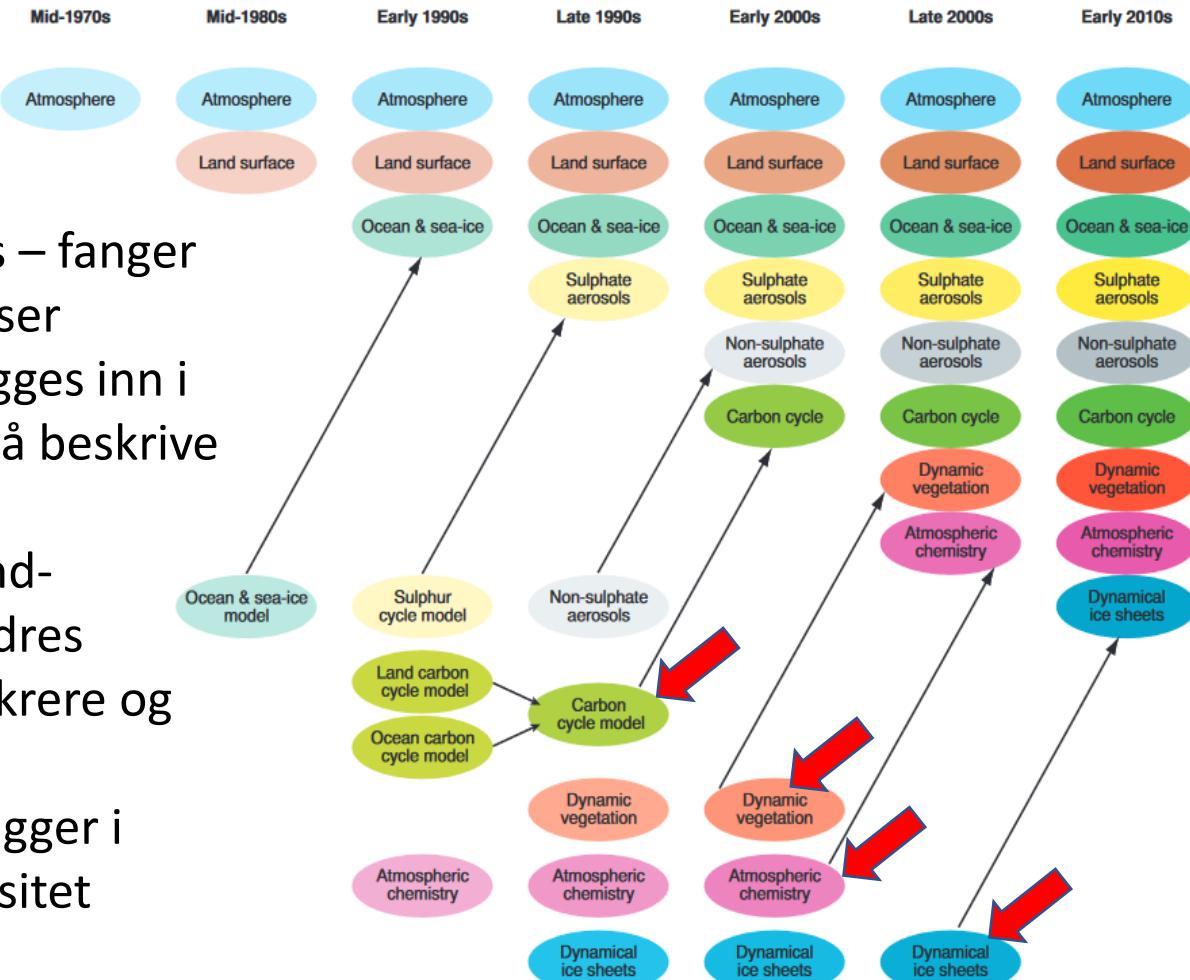
Modeller i flere skalaer



- The global model (**black**): 60km grid spacing,
- The European model (**green**) 20km
- The UK model (**red**) 12km.

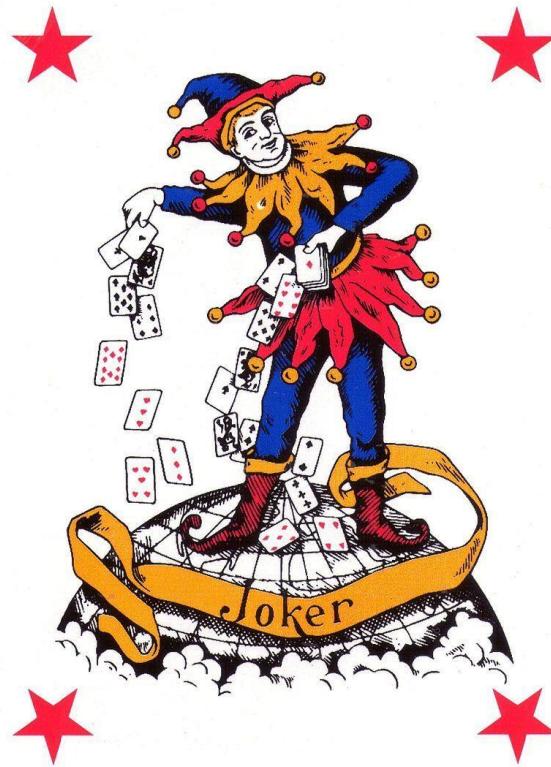
Modellene forbedres kontinuerlig

- Kubene krympes – fanger opp flere prosesser
- Flere forhold bygges inn i modellene – for å beskrive detaljene
- Kvaliteten på randbetingelsene bedres
- Resultatet blir sikrere og sikrere
- Begrensningen ligger i datamaskinkapasitet





Jokerne i klimasystemet

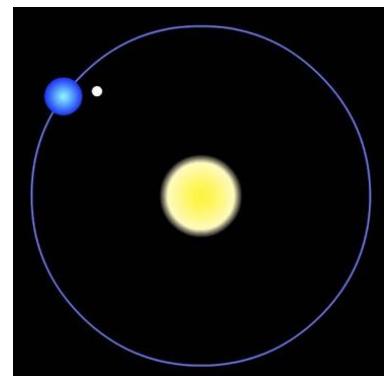


Jokerne i modellene

1. Utslipp av drivhusgasser

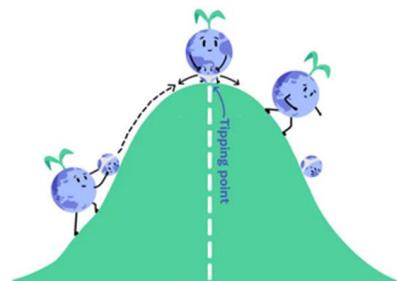


2. Vulkanutbrudd



3. Periodiske endringer i Solens intensitet og Jordens gang rundt Solen

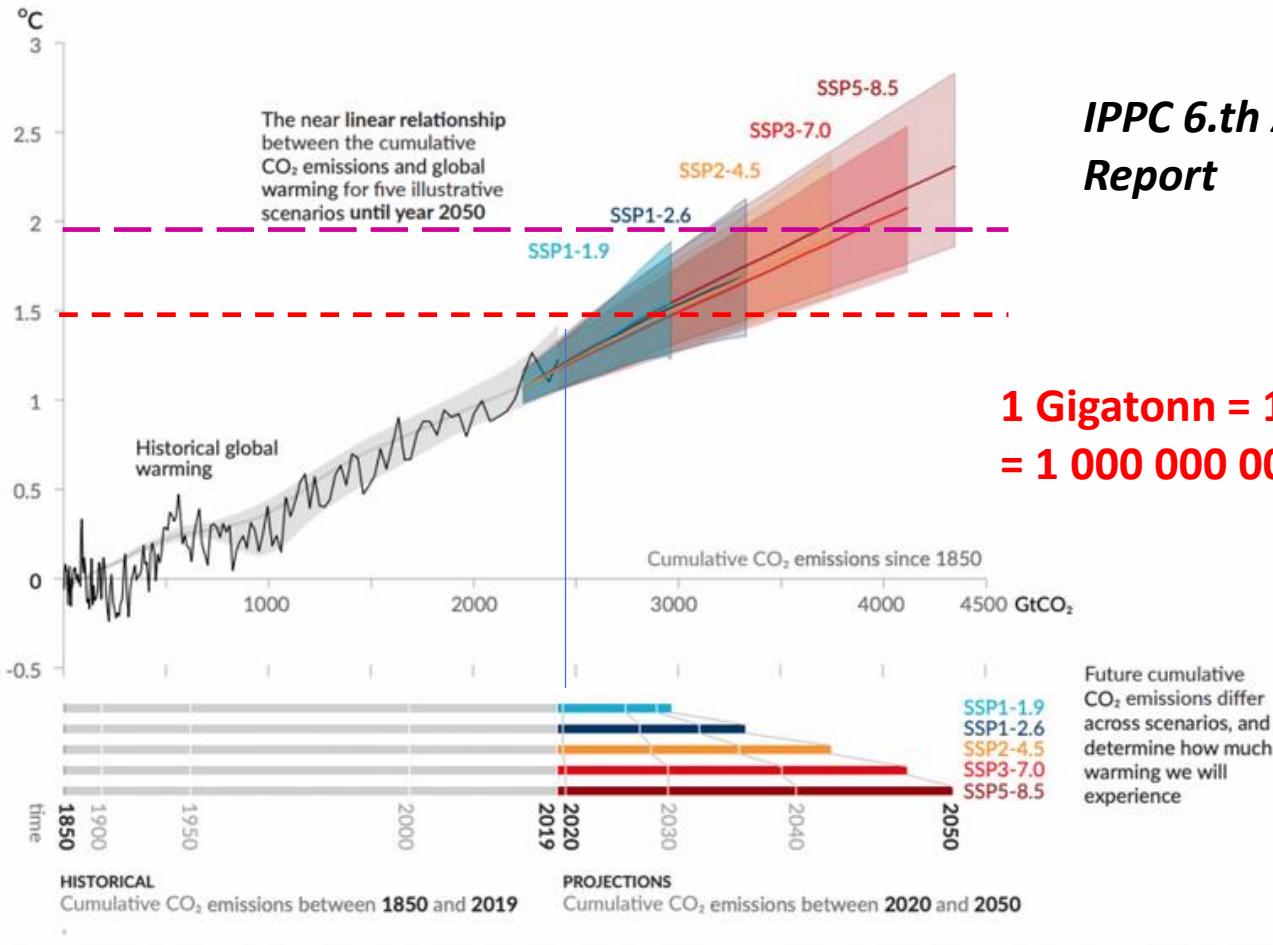
4. Vippepunkter



Joker nr. 1: Utslipp av klimagasser

Every tonne of CO₂ emissions adds to global warming

Global surface temperature increase since 1850-1900 (°C) as a function of cumulative CO₂ emissions (GtCO₂)



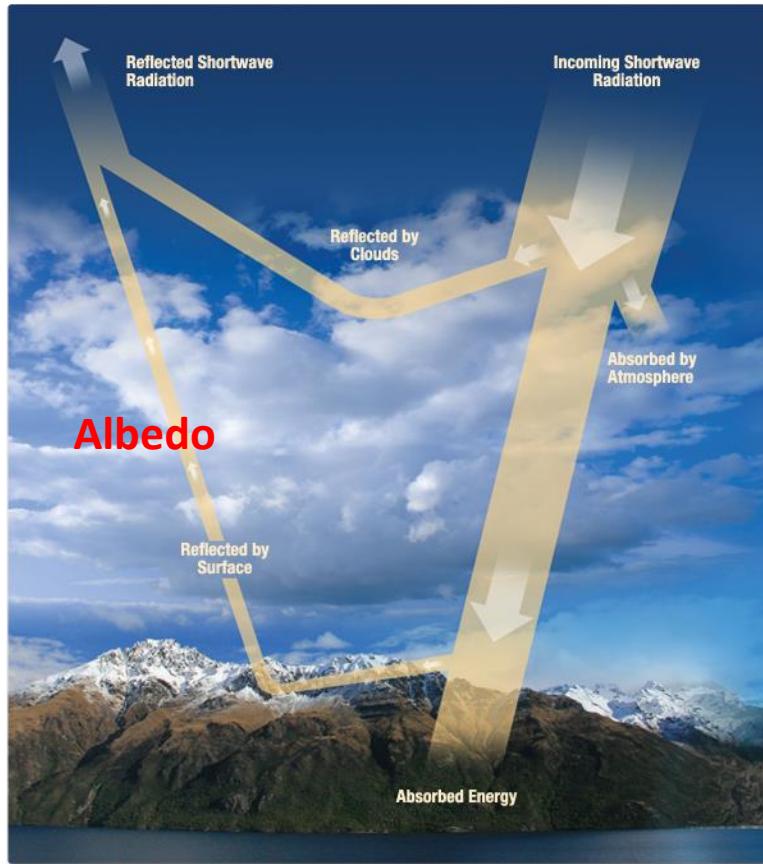
IPPC 6.th Assessment Report

**1 Gigatonn = 1000 mill tonn
= 1 000 000 000 tonn**

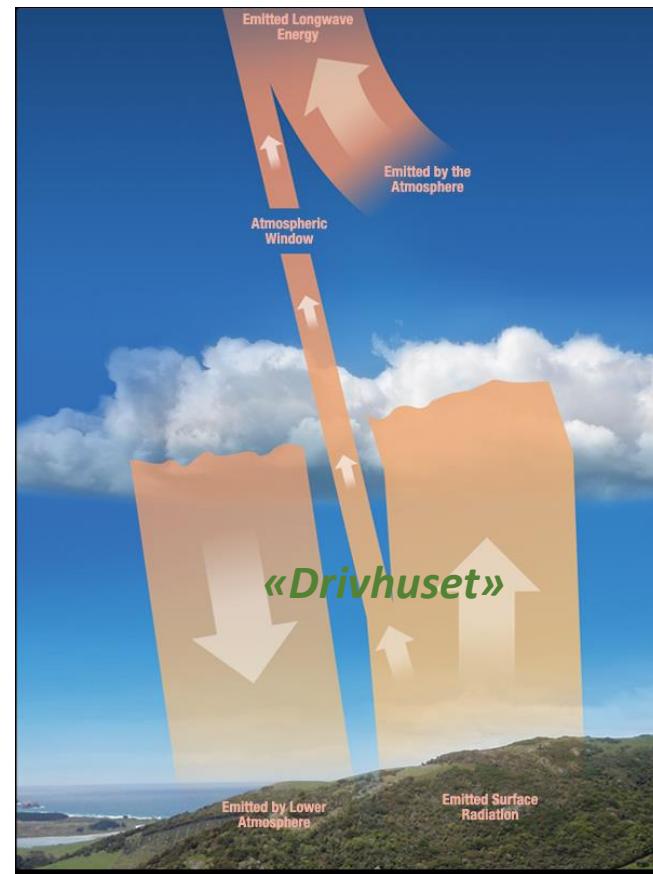
<https://www.climateforesight.eu/future-earth/the-ipccs-sixth-assessment-report-all-the-science-knows-about-past-actual-and-future-climate-change/>

Strålingsfakta

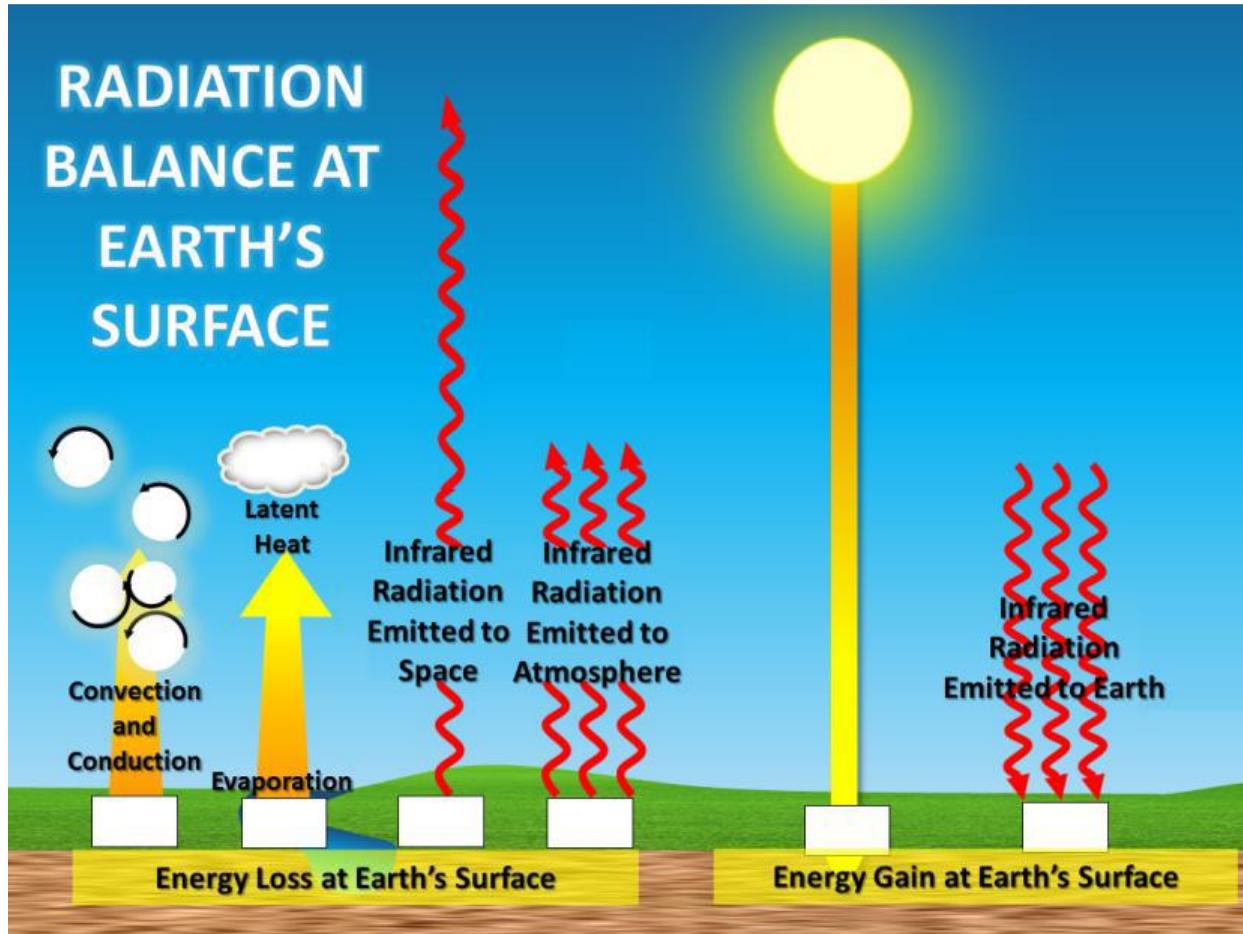
Kortbølget inn



Langbølget ut

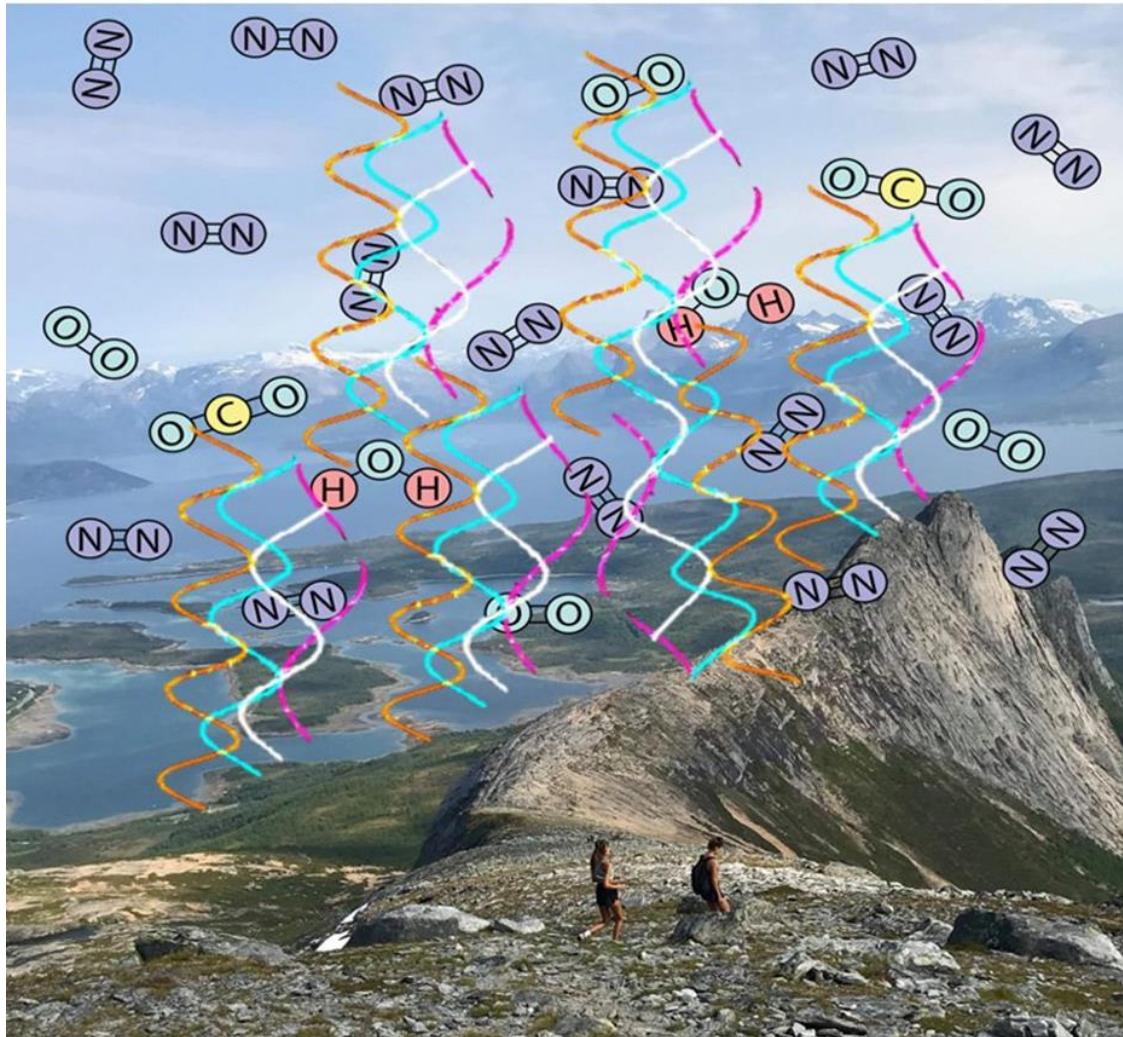


Stråling i balanse? *Ikke lenger nå*



<http://www.ces.fau.edu/nasa/module-2/energy-budget.php>

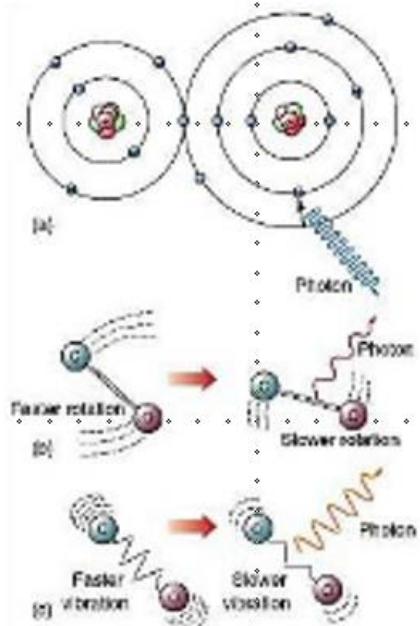
Molekyler og fotoner kolliderer



O = oksygen
N = nitrogen
C = karbon

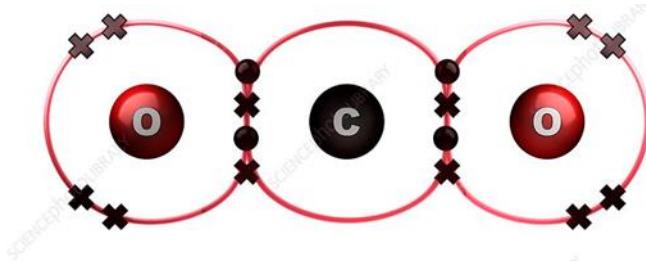
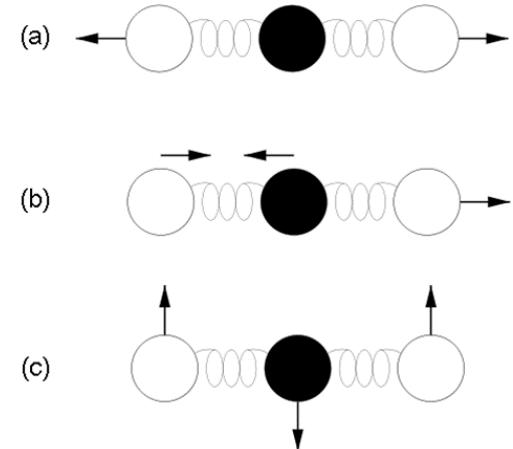
Lagret: <https://www.geoexpro.com/articles/2020/08/recent-advances-in-climate-change-research-part-viii-how-carbon-dioxide-absorbs-earth-s-ir-radiation>

Molekyler absorberer og emitterer fotoner



- Molecules are groups of atoms that share electrons (chemical bonds)
- Molecular transitions involve changes in vibration, rotation, bending, and stretching of chemical bonds
- Photons can interact with molecules to change states
- Transitions involve specific amounts of energy, so **only certain wavelengths are active**

Molecular transitions typically absorb & emit in thermal infrared



- **Eksalteerde CO₂-molekyler**
- **Foton-energi: $E = h * f$**

Scenariske konsekvenser av klimagass-utslipp

	Near term, 2021–2040		Mid-term, 2041–2060		Long term, 2081–2100	
Scenario	Best estimate (°C)	<i>Very likely</i> range (°C)	Best estimate (°C)	<i>Very likely</i> range (°C)	Best estimate (°C)	<i>Very likely</i> range (°C)
SSP1-1.9	1.5	1.2 to 1.7	1.6	1.2 to 2.0	1.4	1.0 to 1.8
SSP1-2.6	1.5	1.2 to 1.8	1.7	1.3 to 2.2	1.8	1.3 to 2.4
SSP2-4.5	1.5	1.2 to 1.8	2.0	1.6 to 2.5	2.7	2.1 to 3.5
SSP3-7.0	1.5	1.2 to 1.8	2.1	1.7 to 2.6	3.6	2.8 to 4.6
SSP5-8.5	1.6	1.3 to 1.9	2.4	1.9 to 3.0	4.4	3.3 to 5.7

<https://www.climateforesight.eu/future-earth/the-ipccs-sixth-assessment-report-all-the-science-knows-about-past-actual-and-future-climate-change/>

IPPC 6.th Assessment Report

Joker nr. 2: Vulkanutbrudd

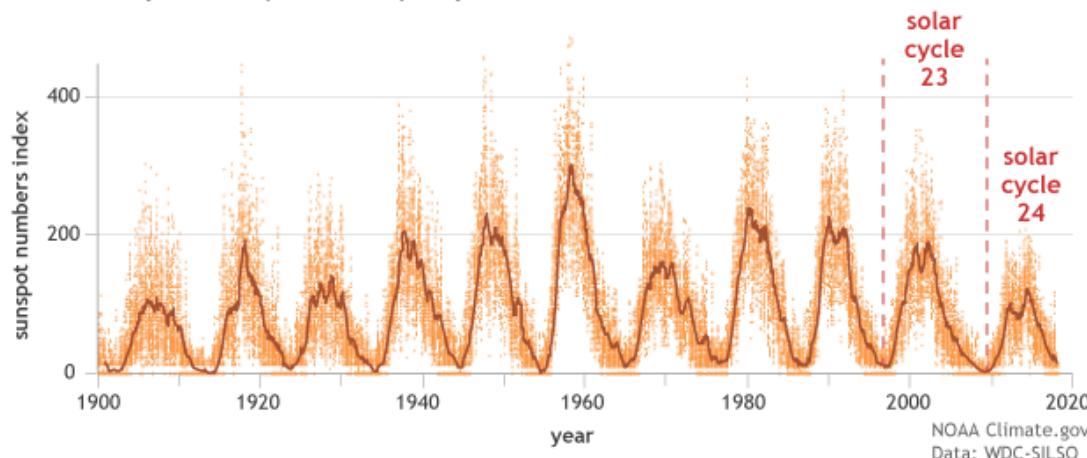
*15. juni 2001 "eksploderte"
Mount Pinatubo på Philippinene*

- Partikler (aerosoler) sprer og absorberer sollys, får vi en avkjøling av Jordens overflate.
- Over de neste 15 måneder ble det målt ca. $0,6^{\circ}\text{C}$ fall i global gjennomsnittstemperatur.
- Effekten varte i ca. 20 år.

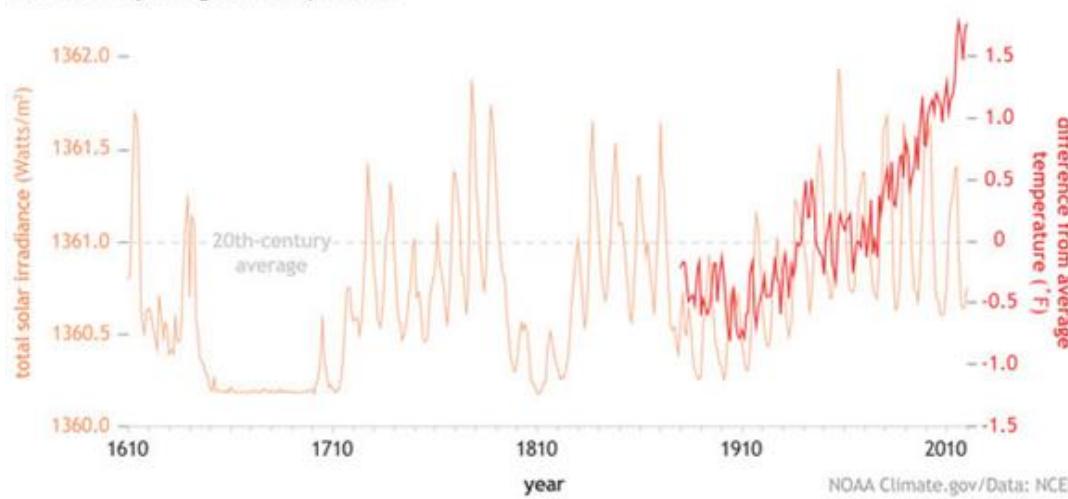


Joker 3b: Solens 11-årige periode – «solflekker»

Solar activity over the past 11 sunspot cycles

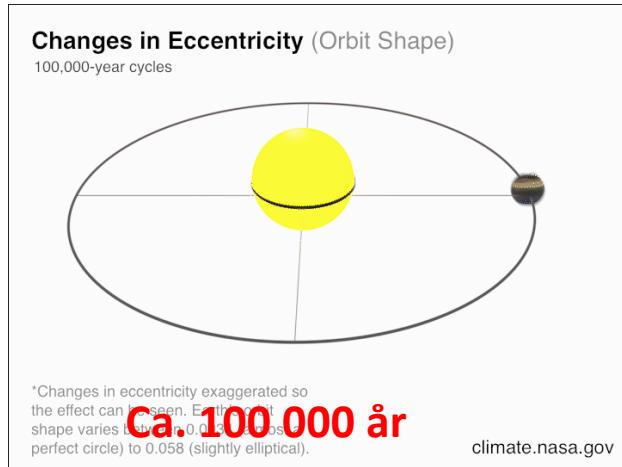


Solar activity and global temperature



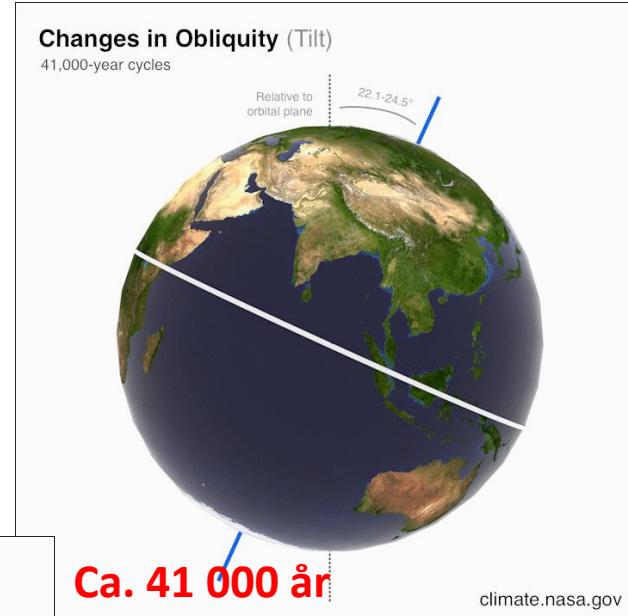
- «Solflekker» markerer perioder med sterk lysstyrke, i perioder på ca. 11 år.
- På det sterkeste varierer lysstyrken med opp til **1 Watt/m²**, tilsvarer opp til **0,1 °C** økning i gjennomsnittlig global temperatur.
- Endringer i Solens lysstyrke siden pre-industriell tid bidrar med **0,01 °C** i målt global temperaturøkning på ca. **1,1 °C**.
- Utslipp av CO₂ i atmosfæren forsinke neste «Milanković-istid» med titusenvis av år.

Joker 3b: Milanković-perioder

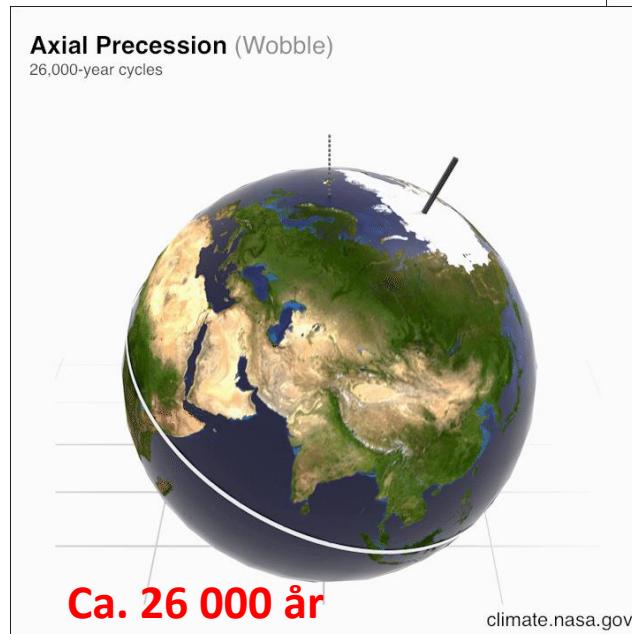


JA,
*Milancowitch-
periodene
påvirker Jordens
klima betydelig*

....

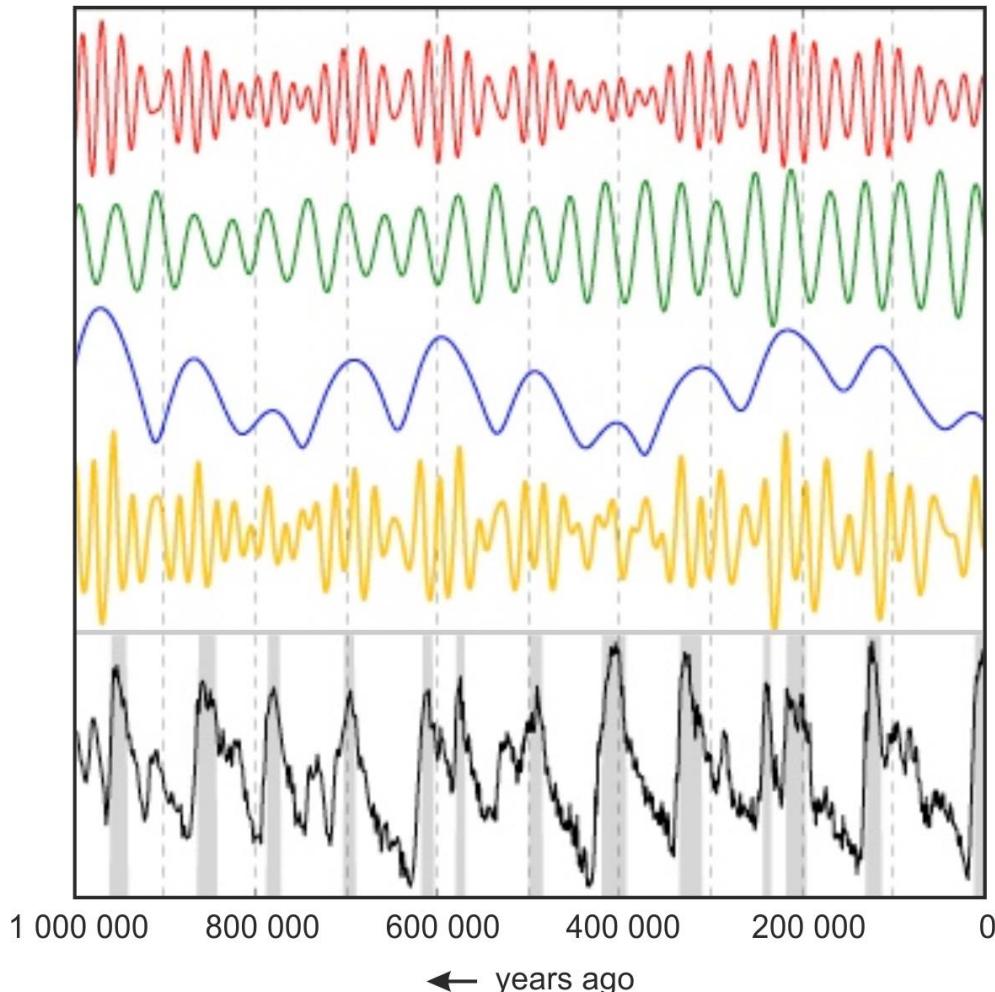


Milutin Milanković
(1879 – 1958)



**... som på neste bilde er
ganske tydelig ...**

Milanković-perioder og klima



Earth's precession
19, 22, 24 thousand years

Inclination of the Earth's axis
41 thousand years

Eccentricity of the Earth's orbit
95, 125, 400 thousand years

Solar forcing
68°N summer

Hot

Milankovitch cycles

Cold



EPICA iskjerne-målinger

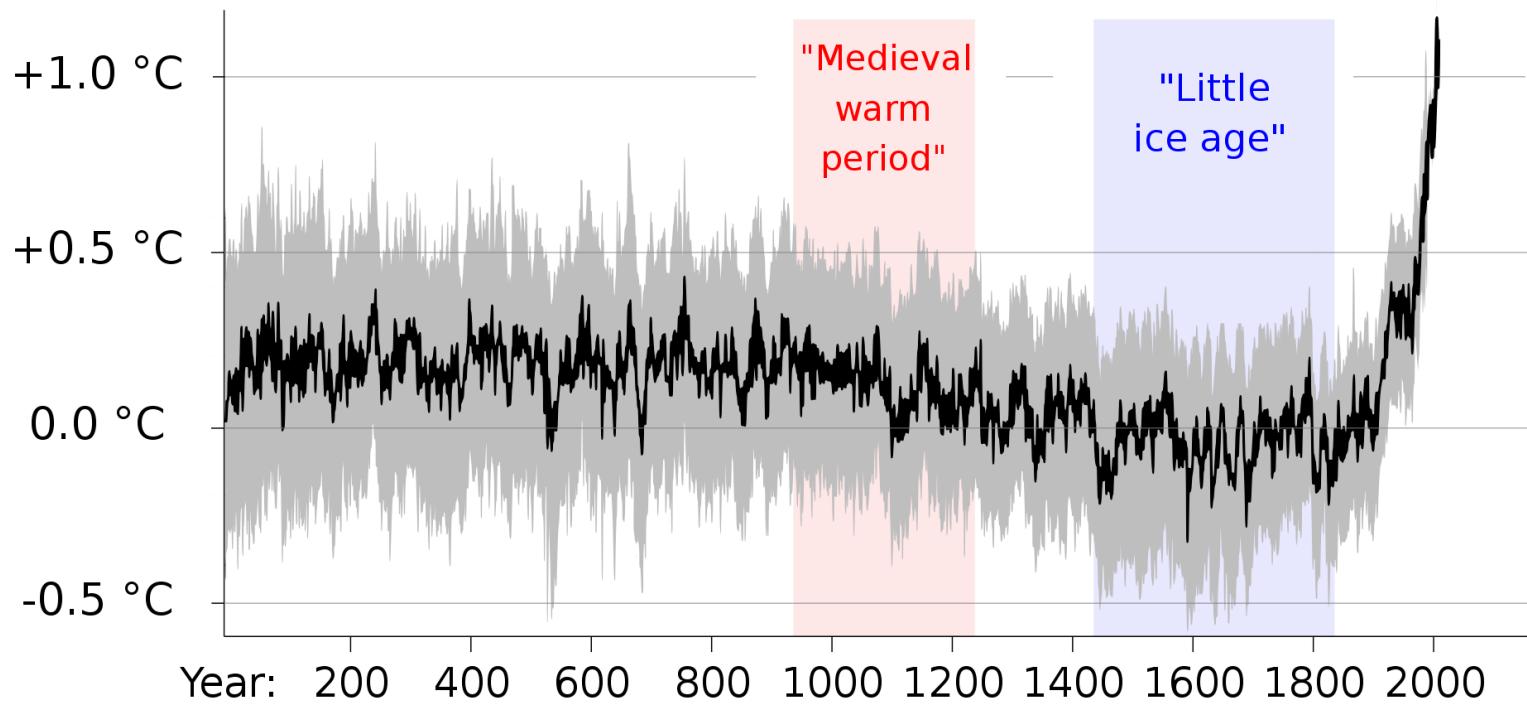


Vostok iskjerne-målinger

→ Milanković-periodene påvirker global temperatur, men periodene er altfor lange til å forklare målt temperaturøkning siden før-industriell tid.

Det har skjedd temperaturendringer før i historien ... **MEN IKKE SÅ RASKT SOM NÅ**

Global Average Temperature Change



From graphic by Ed Hawkins. Data: from PAGES2k (and HadCRUT 4.6 for 2001-). Reference period: 1850-1900.

Ta dette med hjem:

Variasjonene i stråling fra Solen kan ikke forklare den bratte økningen av den Globale Gjennomsnittlige Temperatur de siste 100 år – hverken Milanković-periodene (100 000, 41 000, 26 000 år) eller solflekk-perioder (11 år).

- Solen sender ut *kortbølget* elektromagnetisk stråling (*synlig lys, ultrafiolett +/-*) som går tilnærmet tvers gjennom atmosfæren.
 - Jorden sender ut *langbølget* elektromagnetisk stråling («varmestråling», **infrarødt**); en andel blir «fanget» i atmosfæren - **drivhuseffekten**.
 - En del *kortbølget solstråling* (solenergi) reflekteres rett ut i det interplanetare rom = ALBEDO; resten varmer opp Jorden.
-
- Varmestråling fanges opp av skyer (H_2O) og enkelte atmosfæriske gasser: CO_2 , CH_4 ... «Oppfangingen» skjer fordi disse molekylene er laget slik at de «matcher» energinivået til langbølget elektromagnetisk stråling – de blir **midlertidig eksalterte (vibrasjon etc.)**.
 - Denne tilstanden er ustabil, og energien avgis som infrarød stråling, dvs. varme.
 - Varmen avgis til omkringliggende molekyler f.eks. vanndamp, og som infrarød stråling mot bakken. **Konsekvens: Atmosfæren, landmasser og hav varmes opp.**

RESULTATET ER UBØNNHØRLIG:

DEN GLOBALE GJENNOMSNITTLIGE TEMPERATUR STIGER

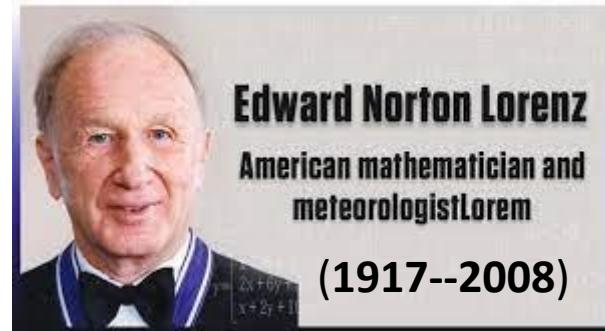
Selv om det skulle være andre faktorer som bidrar til oppvarmingen vi ser, er det klimagasser som dominerer.

SÅ SIER FYSIKKEN I DEN VERDEN VIL LEVER I

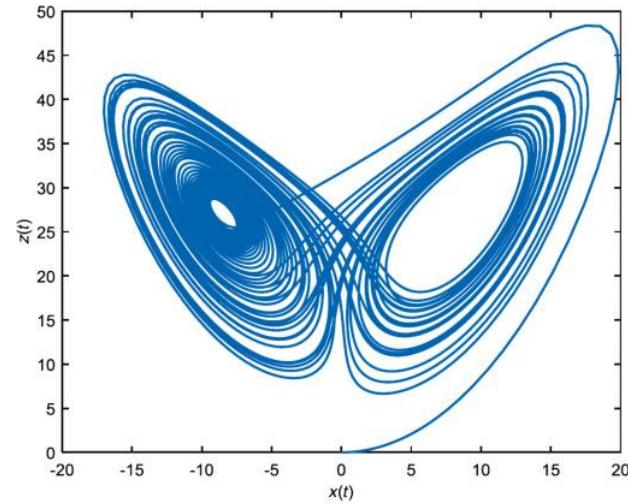
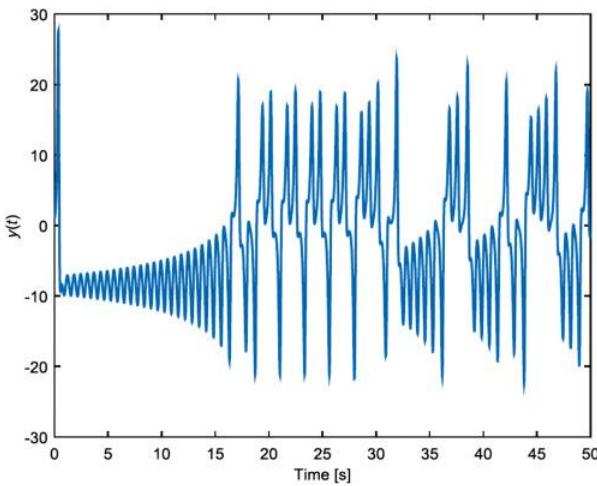
Joker 4: Vippepunkter – klimaets monstre

$$\begin{aligned}\frac{dx}{dt} &= \sigma(y - x), \\ \frac{dy}{dt} &= x(\rho - z) - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - \beta z.\end{aligned}$$

Startverdiene er avgjørende for resultatet

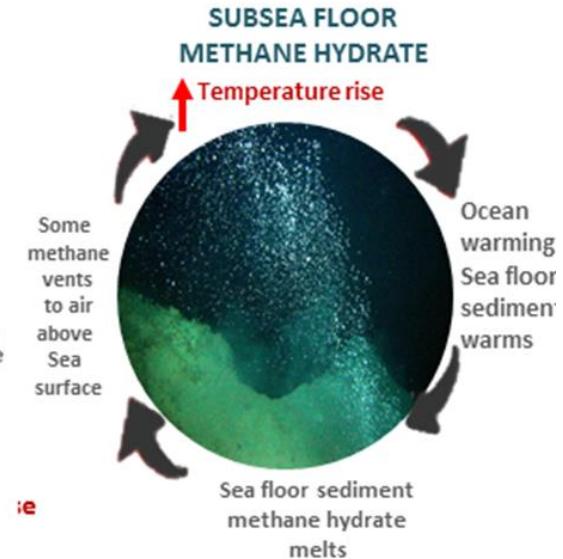
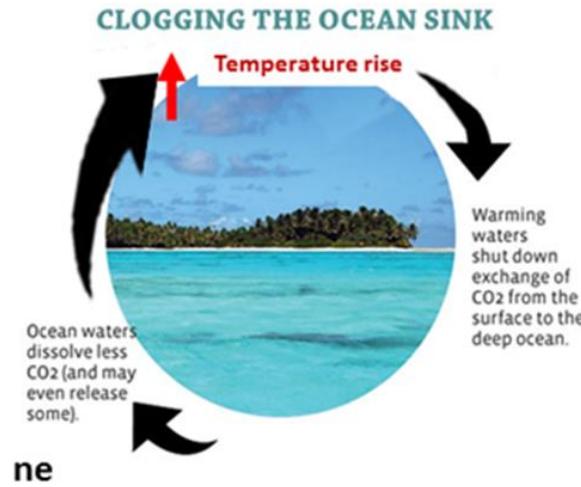
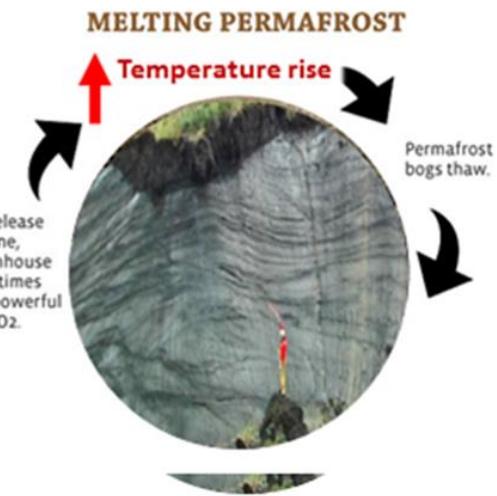
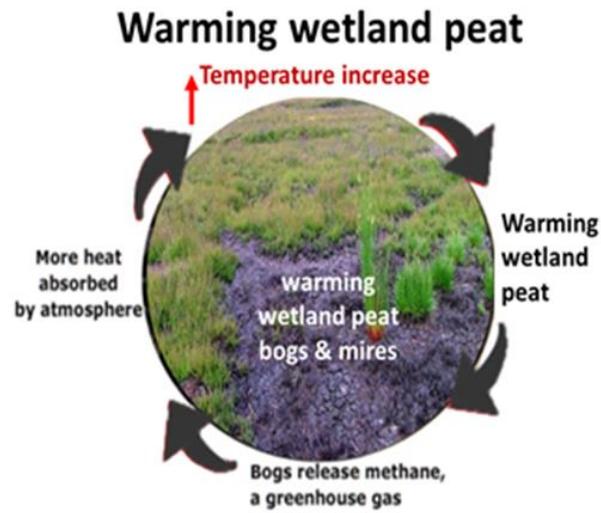


Ikke-lineært, dynamisk system som bifurkerer, kan ikke reverseres

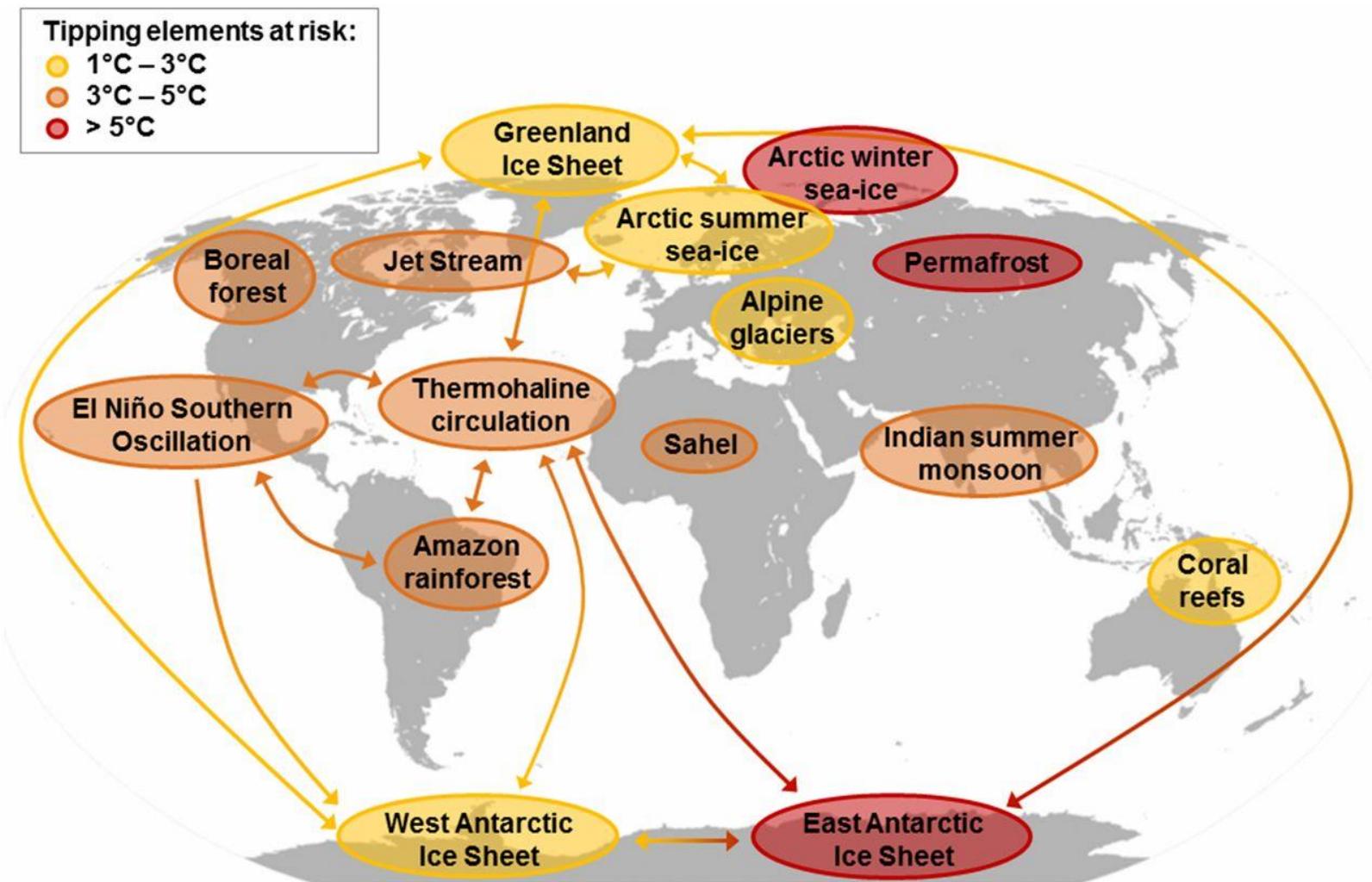


“Does the Flap of a Butterfly’s Wings in Brazil Set Off a Tornado in Texas?”
Edward N. Lorenz, 1972

Vippepunkter i klimasystemet



Global map of potential tipping cascades.



Will Steffen et al. PNAS 2018;115:33:8252-8259

<https://www.pnas.org/content/115/33/8252>

PNAS

Det har skjedd brå endringer før



Reinrose
(*Dryas octopetala*)



Dryas var tre forholdsvis kalde klimaperioder ved slutten av den siste istida med relativt tørt og kjølig klima.

Yngre dryas er en klimaperiode, ofte kalt den store fryseperioden, i en geologisk kort (1300 ± 70 år) periode med kalde klima-tilstander og tørke i perioden fra om lag 12 800 til 11 500 år sidan.

Man tror yngre dryas-tida ble skapt da den nordamerikanske iskalotten kollapset (men det finnes andre motstridende teorier).

https://en.wikipedia.org/wiki/Younger_Dryas

De kalde klimaperiodene er døpt Drias fordi analyse av reinrosen ligger til grunn.

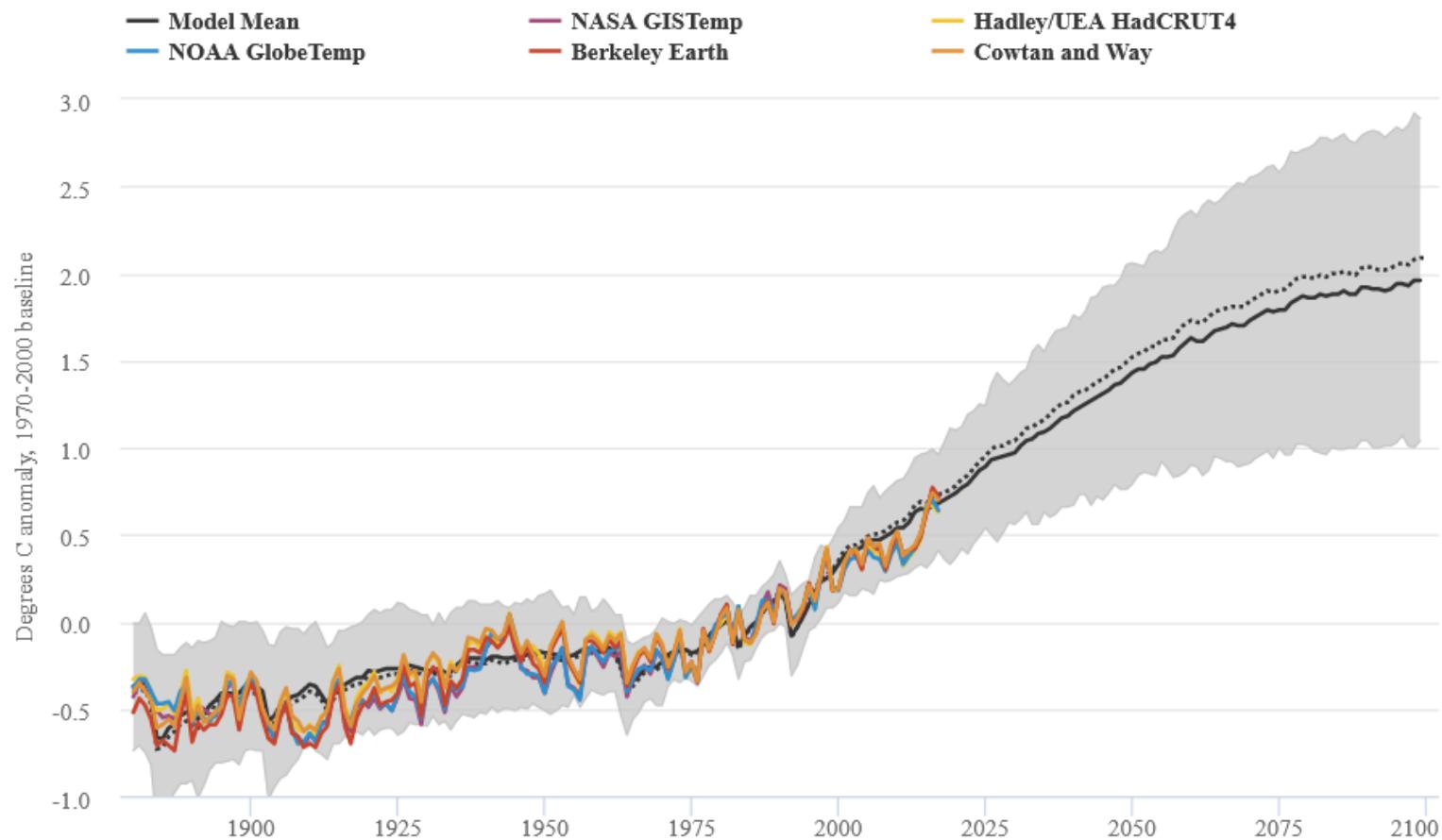
Teorier

- Stans i den Nord-Atlantiske termohaline sirkulasjon
- Nedsmelting av isbreen over Nord-Amerika pga.
 - Vulkanutbrudd?
 - Meteornedslag?

https://nn.wikipedia.org/wiki/Yngre_dryas

Er klimamodeller til å stole på?

Climate models and observations, 1880-2100



CB

Forskerne klør seg i hodet over ekstrem varmebølge i Antarktis og Arktis

- 21. juli 1983 ble det på Vostok målt 89,2 minusgrader, det kaldeste noen gang på jorden.
- I mars måned er normaltemperaturen på Vostok 53 minusgrader.
- Fredag var temperaturen på Vostok minus 17,7 grader. Det høres kanskje ikke varmt ut, men er hele 15 grader varmere enn den tidligere rekorden
- Enda mer oppsiktsvekkende er at samtidig med varmebølgen i Antarktis, er det også langt varmere enn normalt i Arktis.
- En oversikt fra Det danske meteorologiske instituttet viser at temperaturen de siste dagene har vært 14 grader over de normale for årstiden. Det gjelder for områdene over 80 grader nord.
- På den norske øya Hopen ble det 15. mars målt 3,9 plussgrader. Det er den høyeste temperaturen i mars siden målingene begynte i 1944

Er klimamodeller til å stole på - egentlig?

- *Tja → Nei?*

- Erfaringene er blandet fordi fysikken og ligningene er «primitive» - de er basert på linearitet – men stemmer ganske bra med observasjoner
- **Problem:** Kvaliteten på rand/start-verdier inkl. antagelser om fremtidig CO₂ og andre forhold.
- **Problem:** Det globale systemet er svært komplekst - mange og store forenklinger i ligningene nødvendig.
- **Problem:** Vippepunkter – klimamodellenes store svakhet.
 - Det blir verre enn predikert – endringene skjer raskere enn forventet
 - 2-graders grensen gir ingen sikkerhet, ikke 1,5 heller

