



Ilmastosteemi ja takaisinkytkentämekanismi

Sampo Saari

Fysiikan lehtori, PhD

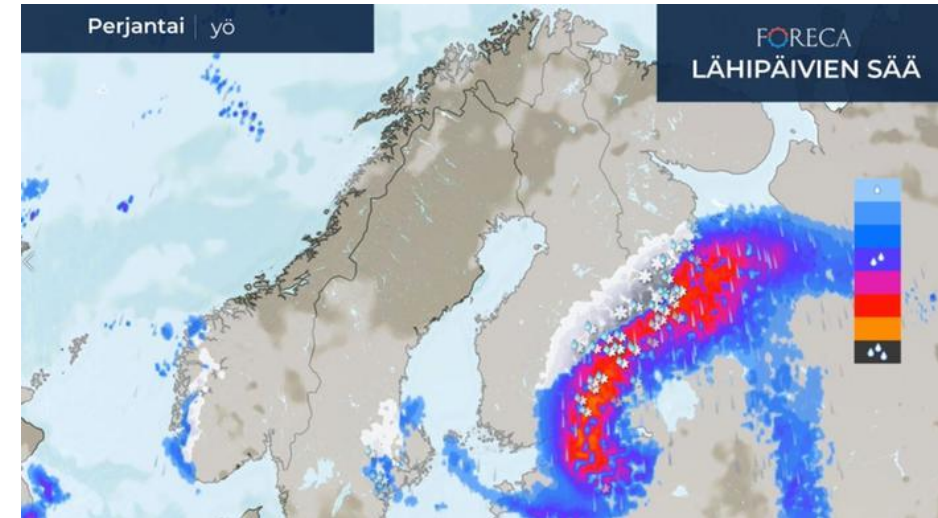
TAMK

Ilmasto vs. sää

Sää = paikallinen olosuhde lyhyellä aikavälillä

Ilmasto = paikallinen olosuhde pitkällä aikavälillä

Globaali ilmasto = keskiarvo paikallisista ilmastoista



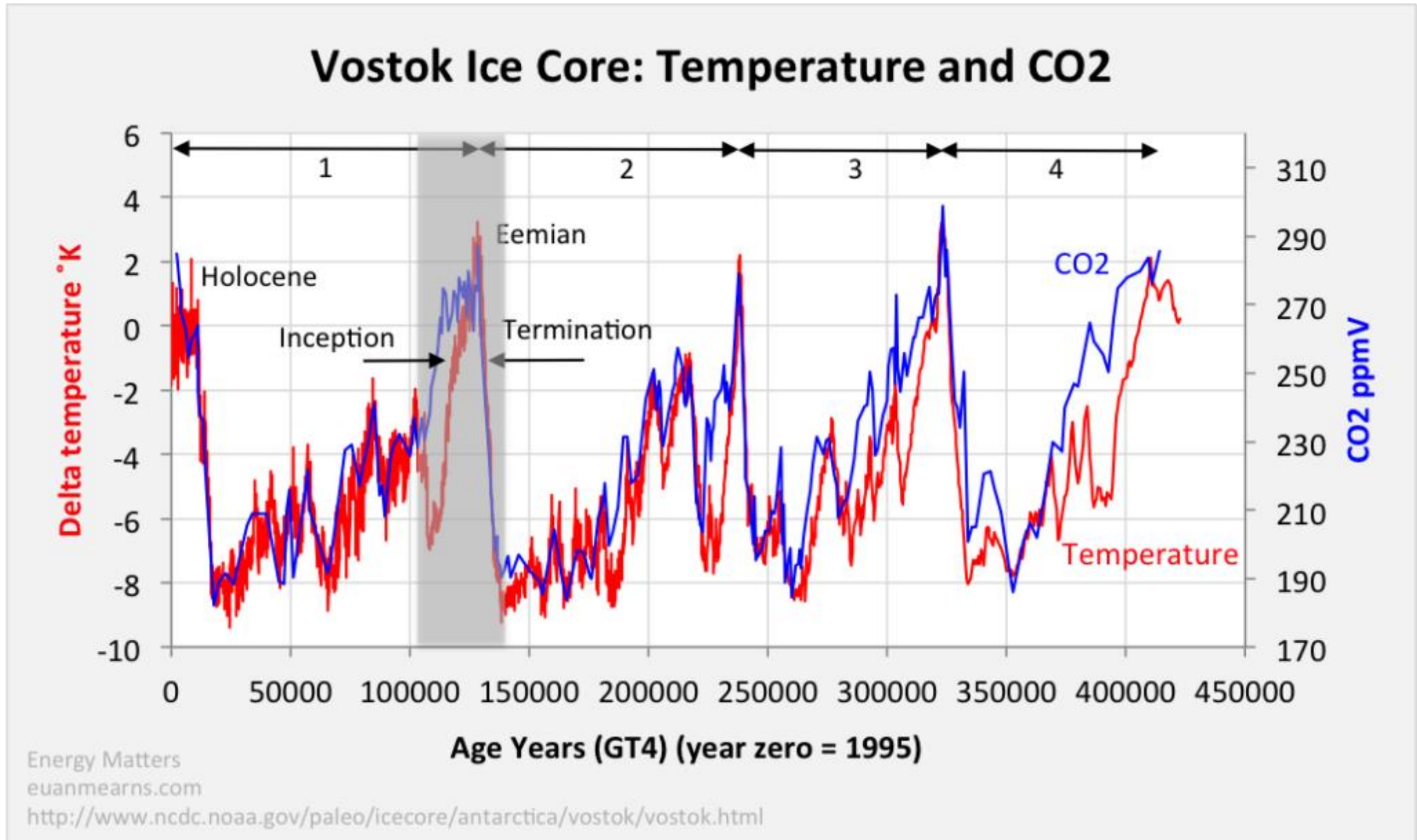
Sääolosuhteisiin vaikuttaa seuraavat parametrit, joita voidaan mitata tai aistia:

- Lämpötila
- Tuuli
- Sade
- Kosteus
- Pilvisyys
- Valo (auringon säteily)
- Näkyvyys
- Ilmanlaatu

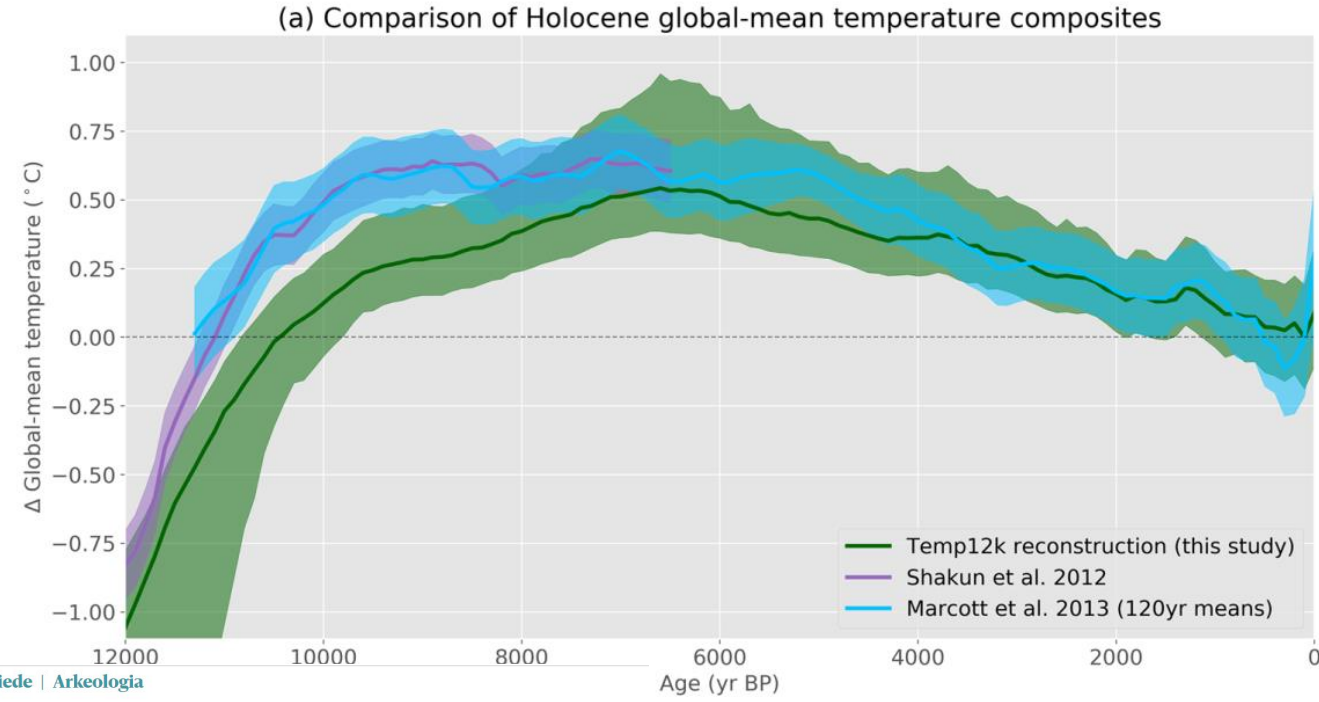
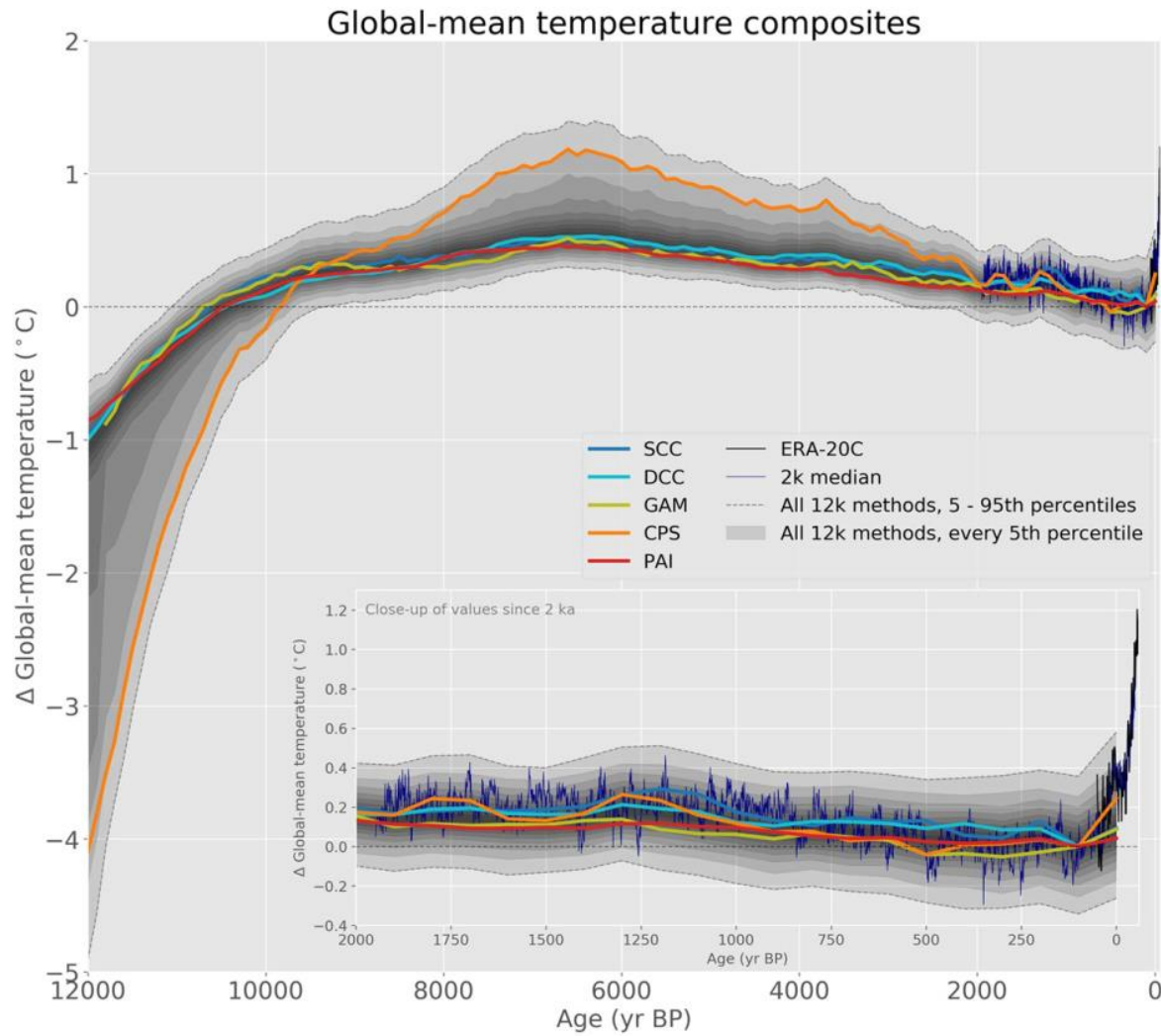
=> Vaikutus ihmisen ja biosfäärin toimintaan



Historiallinen data (D₂-proxy)



Holoseenin keskilämpötila (proxy)



Tiede | Arkeologia

Ikijää suli Norjan vuoristossa, ja alta paljastui jopa noin 6 000 vuotta vanhoja nuolia

Jotunheimenin ikijää Keski-Norjassa on alkanut sulaa ilmastonmuutoksen takia.

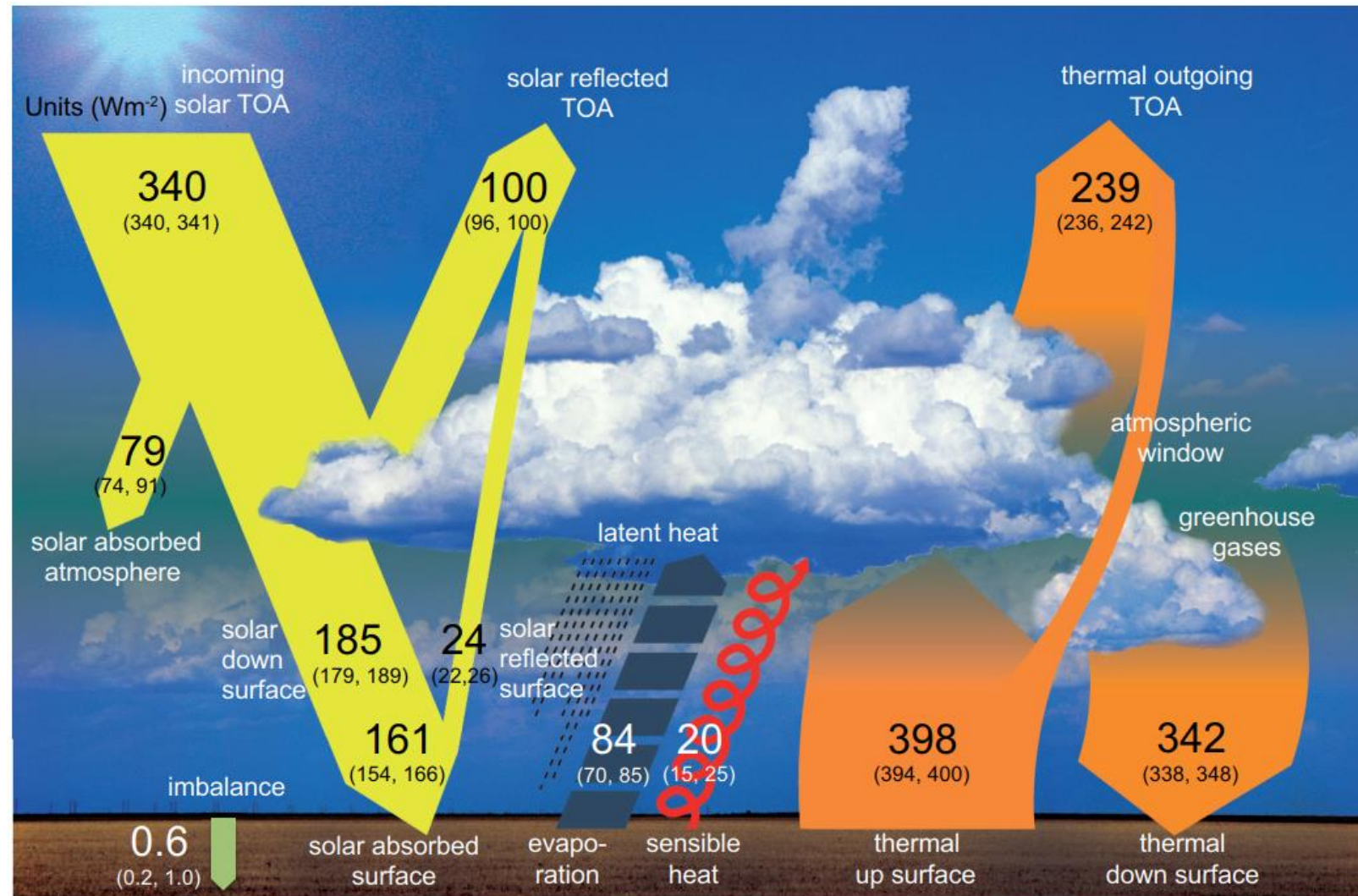


Kaufman et al., 2020, Nature

Fig. 3 Global mean surface temperature from the Temperature 12k database using d methods. The fine black line is instrumental data for 1900–2010 from the ERA-20C r inset displays an enlarged view of the past 2000 years. See Fig. 2 for additional explan

Säteilytasapaino ja kasvihuoneilmiö

- Maapallon energia pääasiassa peräisin auringon säteilystä (n. 340 W/m^2)
- Osa säteilystä heijastuu pilvistä ja Maan pinnalta takaisin avaruuteen Albedon (heijastuvuus) vaikutuksesta (n. 30%)
- Osa säteilystä absorboituu (imeytyy) ilmakehään (n. 20%)
- Loput säteilystä absorboituu Maan pintaan (n. 50%)
- Maan pinta luovuttaa lämpöä ilmakehään ja avaruuteen lämpösäteilyn, konvektion ja latenttilämmön avulla
- Maan lämpösäteilystä suurin osa (n. 80%) absorboituu ilmakehään
- **Ilmakehä säteilee ja heijastaa lämpösäteilyä takaisin Maan pinnalle ja avaruuteen => Kasvihuoneilmiö**
- Maapallon säteilytasapaino (+muu lämmönsiirto) vaikuttaa suoraan maan pinnan lämpötilaan



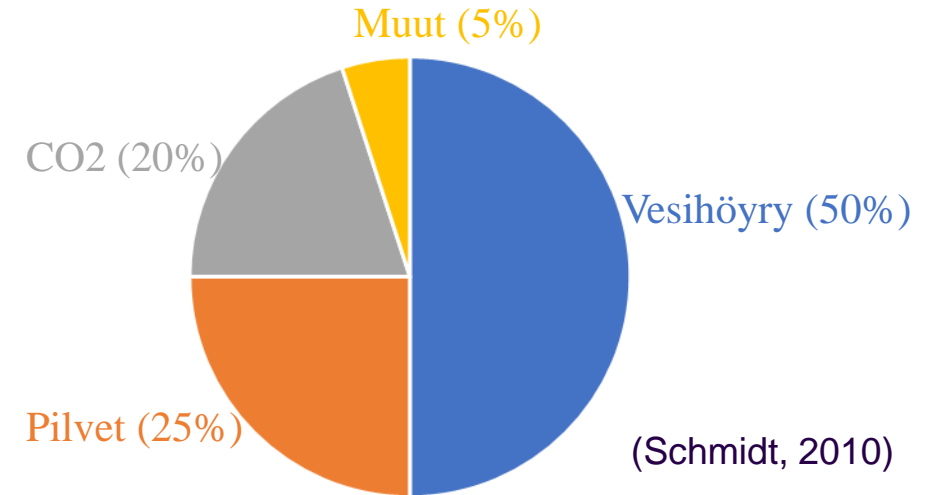
(Kuva: IPCC, 2014)

Mikä on merkittävin kasvihuonekaasu?

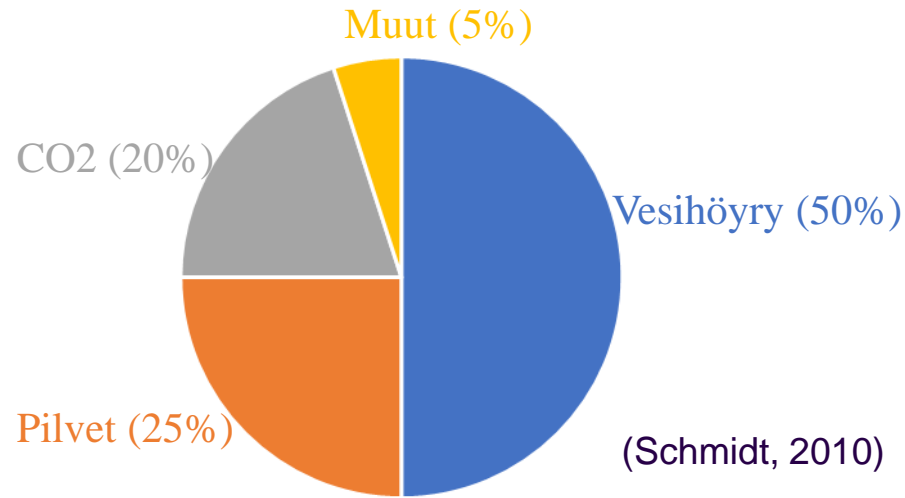
**Pitoisuus
ilmakehässä**

- a) Hiilidioksidi ~400 ppm
- b) Metaani 1.8 ppm
- c) Otsoni 2-8 ppm
- d) Vesi 10000-50000 ppm

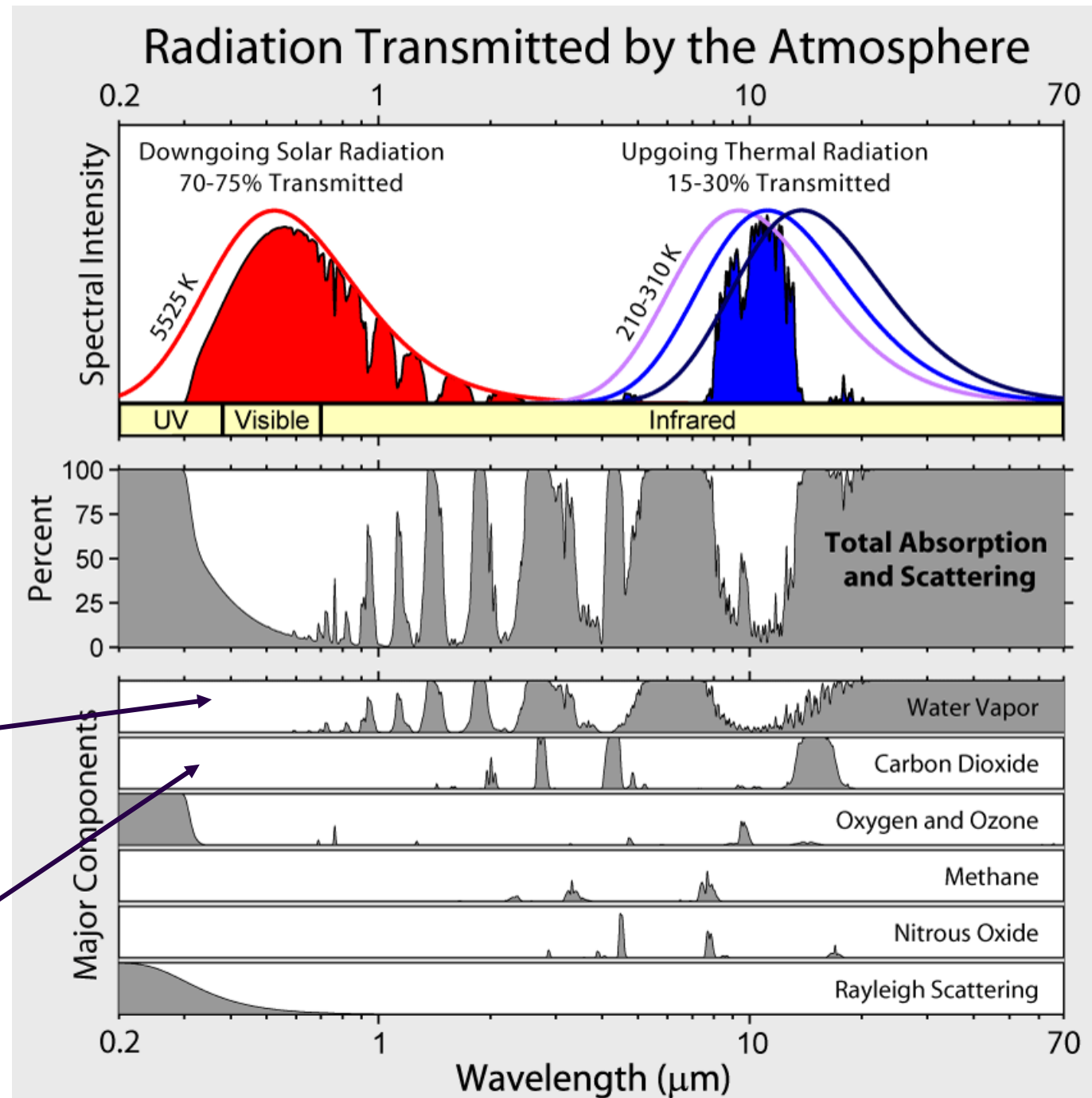
**Vaikutus
kasvihuoneilmiöön**



Kasvihuonekaasujen absorptio Maan säteilystä

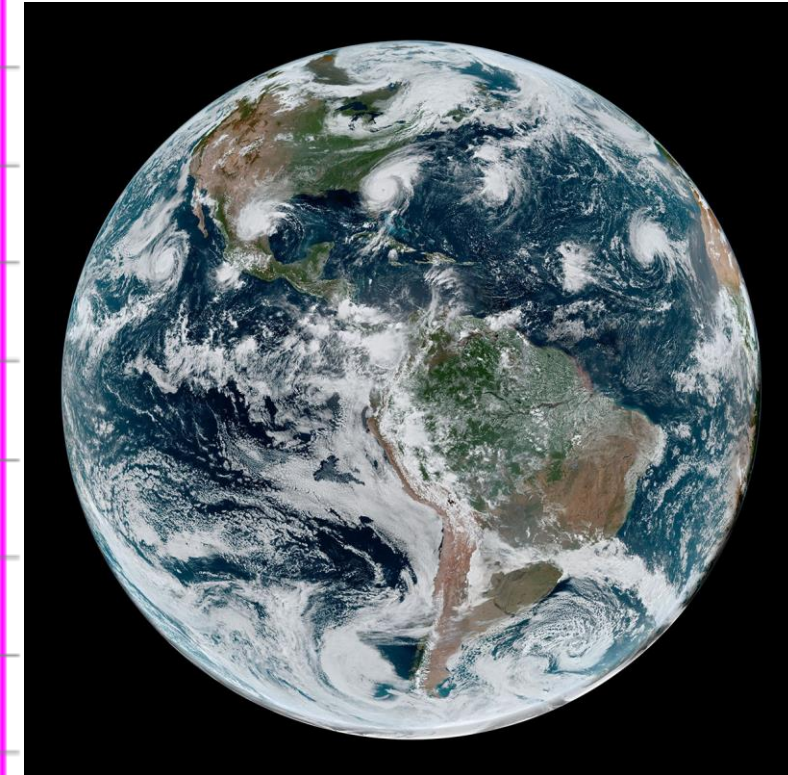
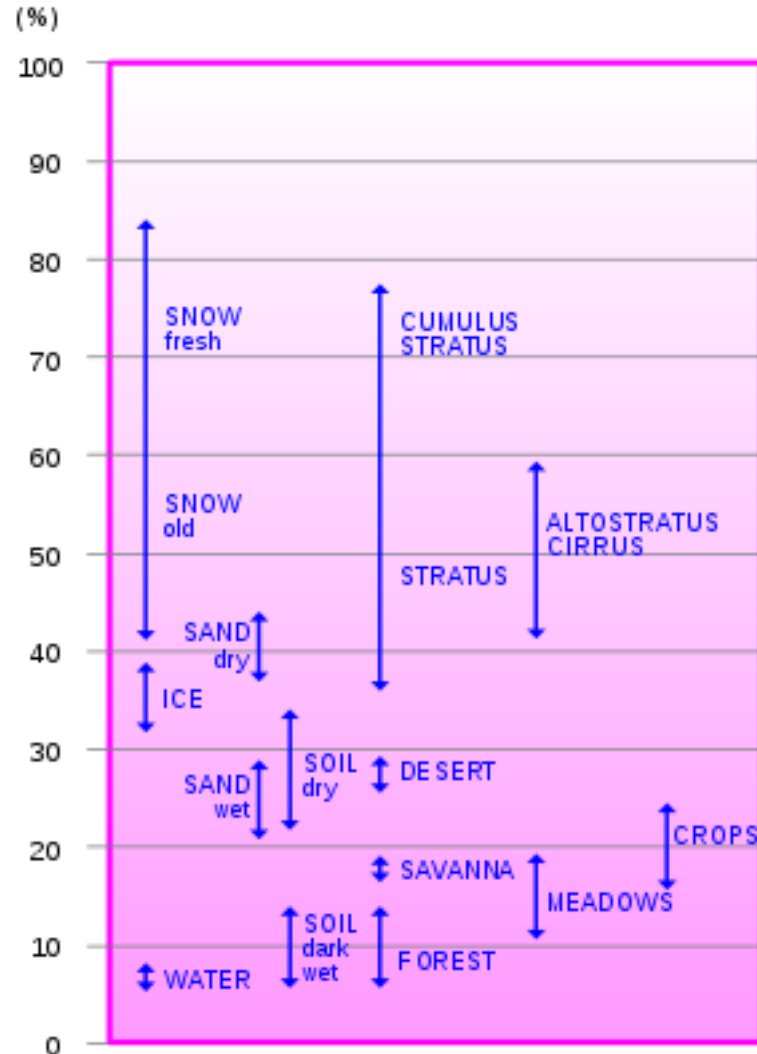


- Vesihöyry absorboi (imee) maasta lähtevästä infrapunasäteilystä n. 50%, koska
 - Absorptioalue on laaja
 - H₂O pitoisuus on suuri
- Pilvien absorptio maan infrapunasäteilystä on n. 25%
- Hiilidioksidi absorboi maan infrapunasäteilystä n. 20%
 - CO₂-pitoisuuden tuplaaminen (300 => 600 ppm) lisäisi absorptiota n. 10%, koska absorptio on jo osittain saturoitunut



Albedo (heijastuvuus)

- Auringon säteilyn heijastukseen (albedo) vaikuttaa maan pintakerroksen albedo sekä ilmakehän pilvisyys
- Maapallon kokonaisalbedo on n. 0.3 – 0.35
- Ilmastomalleissa oletetaan yleensä vakioksi (0.3)
- Maalla albedoon (0.1 – 0.4) vaikuttaa kasvillisuus ja maaperä (+rakentaminen)
- Merellä albedoon (0.06) vaikuttaa jonkin verran pinta-plankton
- Keskimääräinen pilvisyys (pilvipeitto) on n. 0.68 (Stubenrauch et al. ,2013)
- => Pilvet dominoivat Maan albedoa
- Pilvisyyteen vaikuttaa:
 - vesihöyryn määrä
 - pilviytimet (hiukkaset)
 - ilmakehän sekoittuminen

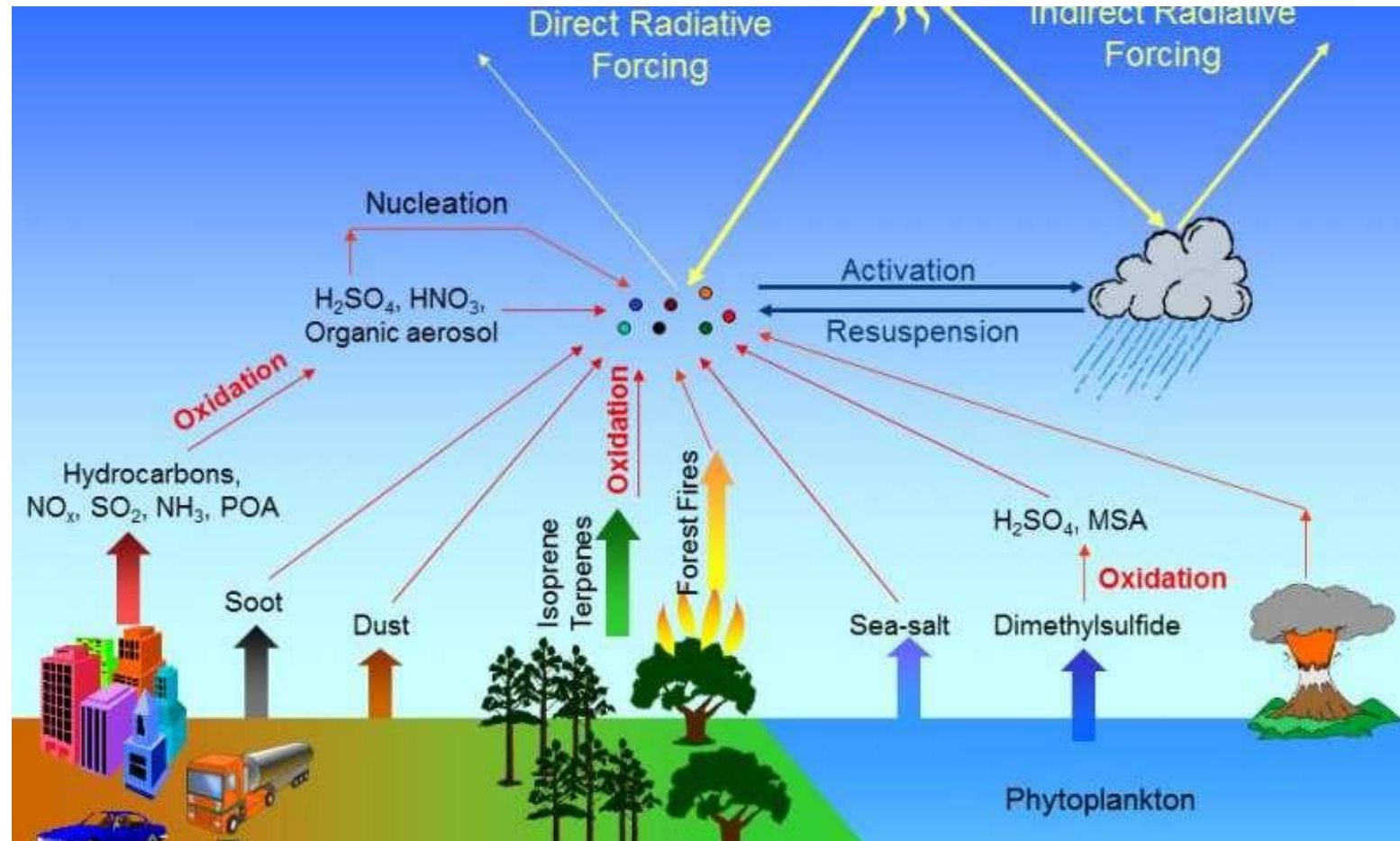


Kuva: NASA

Aerosolit eli pienhiukkaset

- Ilmakehässä pilvipisaran muodostukseen tarvitaan pilviydin (CCN = cloud condensation nuclei)
- Jääpilvien muodostukseen tarvitaan jääydin (IN = ice nuclei)
- Hiukkasilla merkittävä vaikutus erilaisten pilvien muodostukseen ja sateisiin
- => Vaikutus albedoon ja hydrologiseen kiertoon!!!
- Hiukkasten suora säteilypakote + jäätiköt
- Ihmisperäiset ja luonnolliset hiukkaset
- Primääri- ja sekundäärihiukkaset
- Black Carbon

Kuvat: <https://phys.org/>



Säteilypakote vs. lämpötila

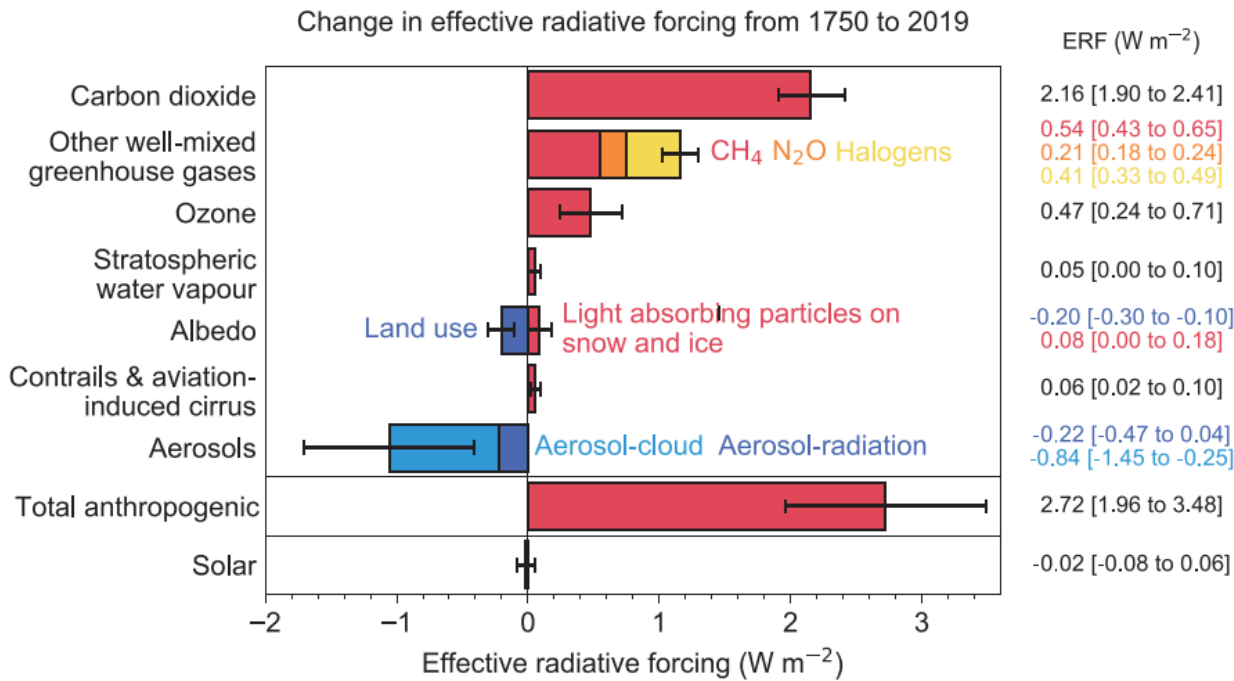


Figure 7.6 | Change in effective radiative forcing (ERF) from 1750 to 2019 by contributing forcing agents (carbon dioxide, other well-mixed greenhouse gases (WMGHGs), ozone, stratospheric water vapour, surface albedo, contrails and aviation-induced cirrus, aerosols, anthropogenic total, and solar). Solid bars represent best estimates, and *very likely* (5–95%) ranges are given by error bars. Non-CO₂ WMGHGs are further broken down into contributions from methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and halogenated compounds. Surface albedo is broken down into land-use changes and light-absorbing particles on snow and ice. Aerosols are broken down into contributions from aerosol–cloud interactions (ERFac) and aerosol–radiation interactions (ERFari). For aerosols and solar, the 2019 single-year values are given (Table 7.8), which differ from the headline assessments in both cases. Volcanic forcing is not shown due to the episodic nature of volcanic eruptions. Further details on data sources and processing are available in the chapter data table (Table 7.SM.14).

IPCC AR6, Climate Change 2021,
Physical Science Basis

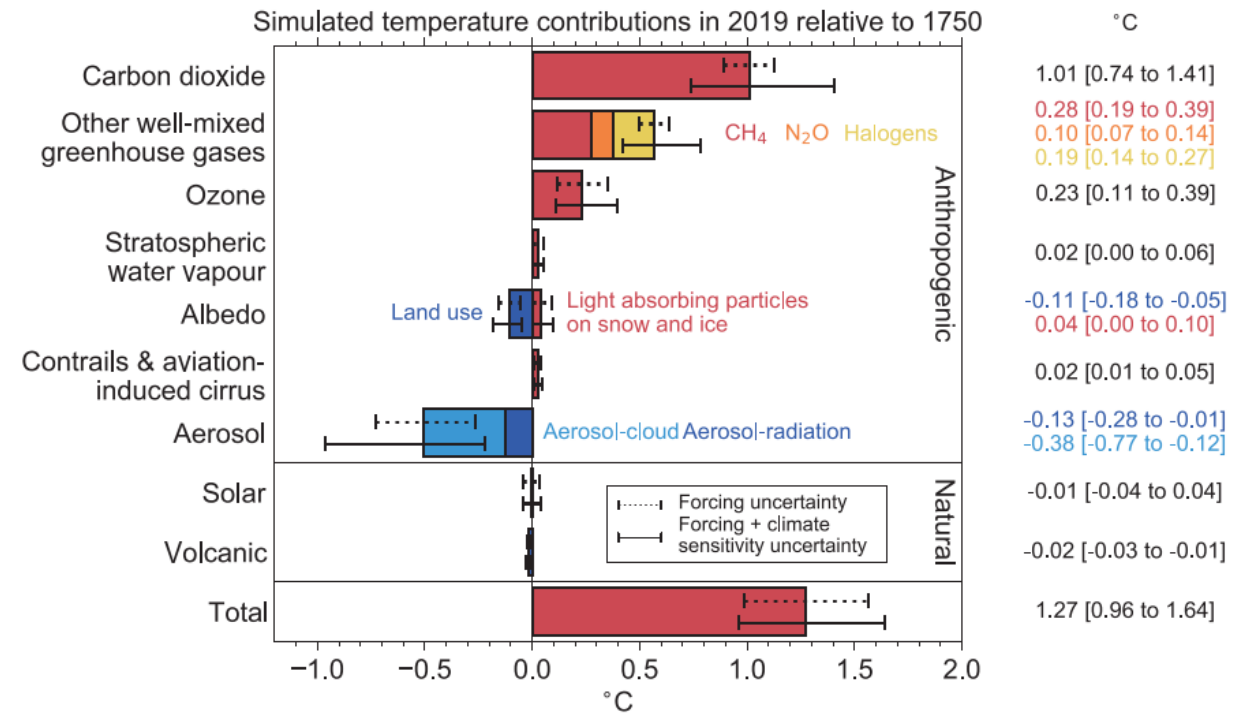
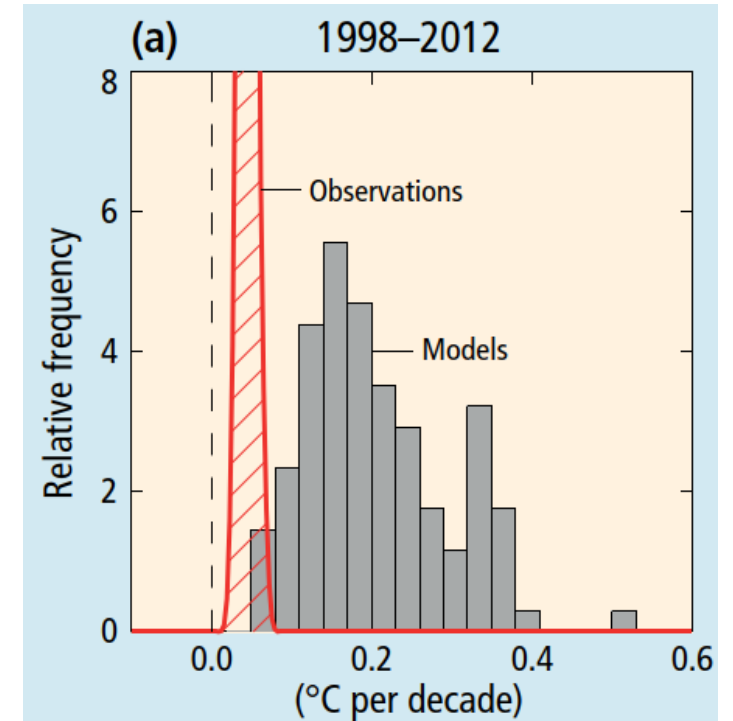
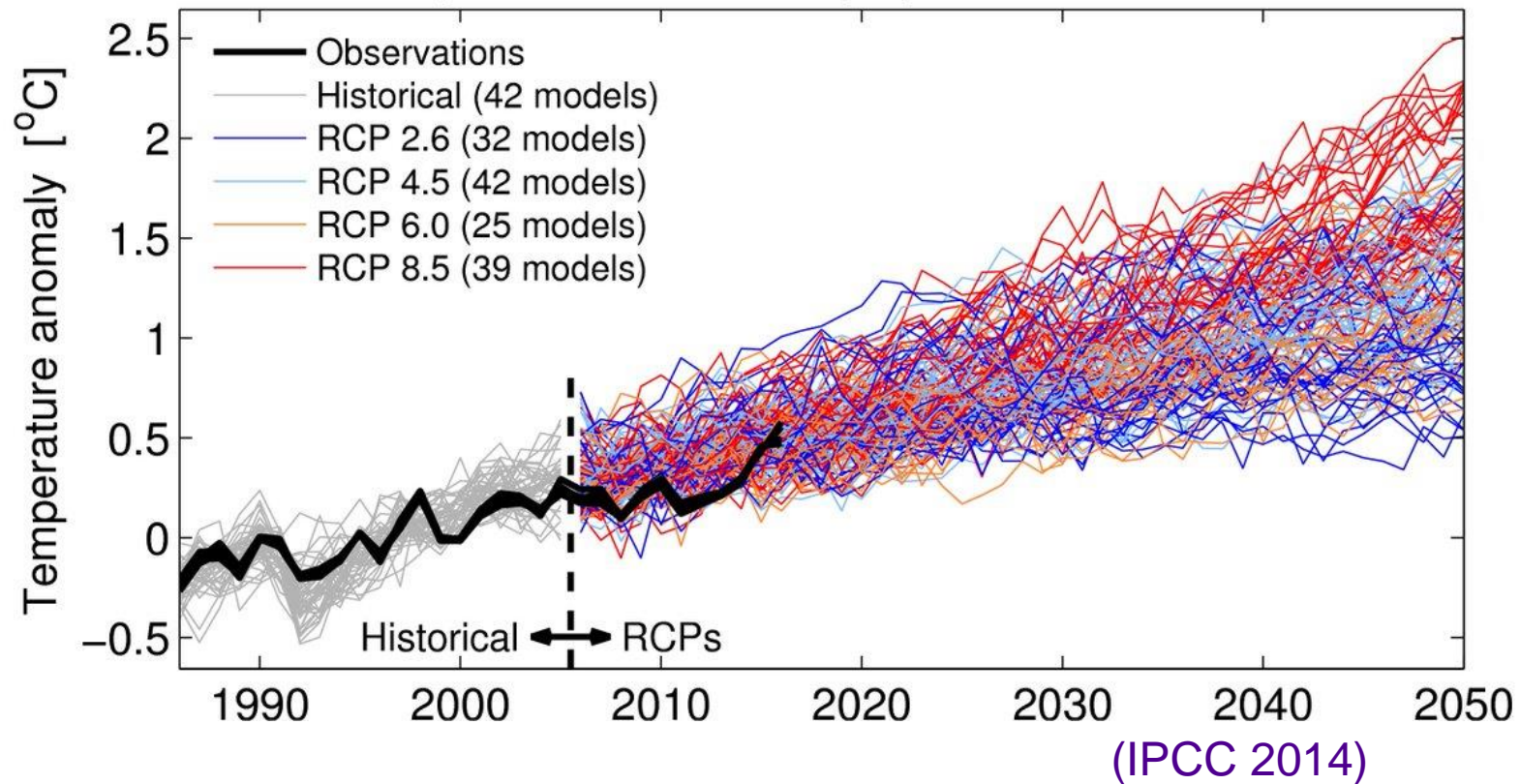


Figure 7.7 | The contribution of forcing agents to 2019 temperature change relative to 1750 produced using the two-layer emulator (Supplementary Material 7.SM.2), constrained to assessed ranges for key climate metrics described in Cross-Chapter Box 7.1. The results are from a 2237-member ensemble. Temperature contributions are expressed for carbon dioxide, other well-mixed greenhouse gases (WMGHGs), ozone, stratospheric water vapour, surface albedo, contrails and aviation-induced cirrus, aerosols, solar, volcanic, and total. Solid bars represent best estimates, and *very likely* (5–95%) ranges are given by error bars. Dashed error bars show the contribution of forcing uncertainty alone, using best estimates of ECS (3.0°C), TCR (1.8°C) and two-layer model parameters representing the CMIP6 multi-model mean. Solid error bars show the combined effects of forcing and climate response uncertainty using the distribution of ECS and TCR from Tables 7.13 and 7.14, and the distribution of calibrated model parameters from 44 CMIP6 models. Non-CO₂ WMGHGs are further broken down into contributions from methane (CH₄), nitrous oxide (N₂O) and halogenated compounds. Surface albedo is broken down into land-use changes and light-absorbing particles on snow and ice. Aerosols are broken down into contributions from aerosol–cloud interactions (ERFac) and aerosol–radiation interactions (ERFari). Further details on data sources and processing are available in the chapter data table (Table 7.SM.14).

Ennusteet tulevaisuuteen

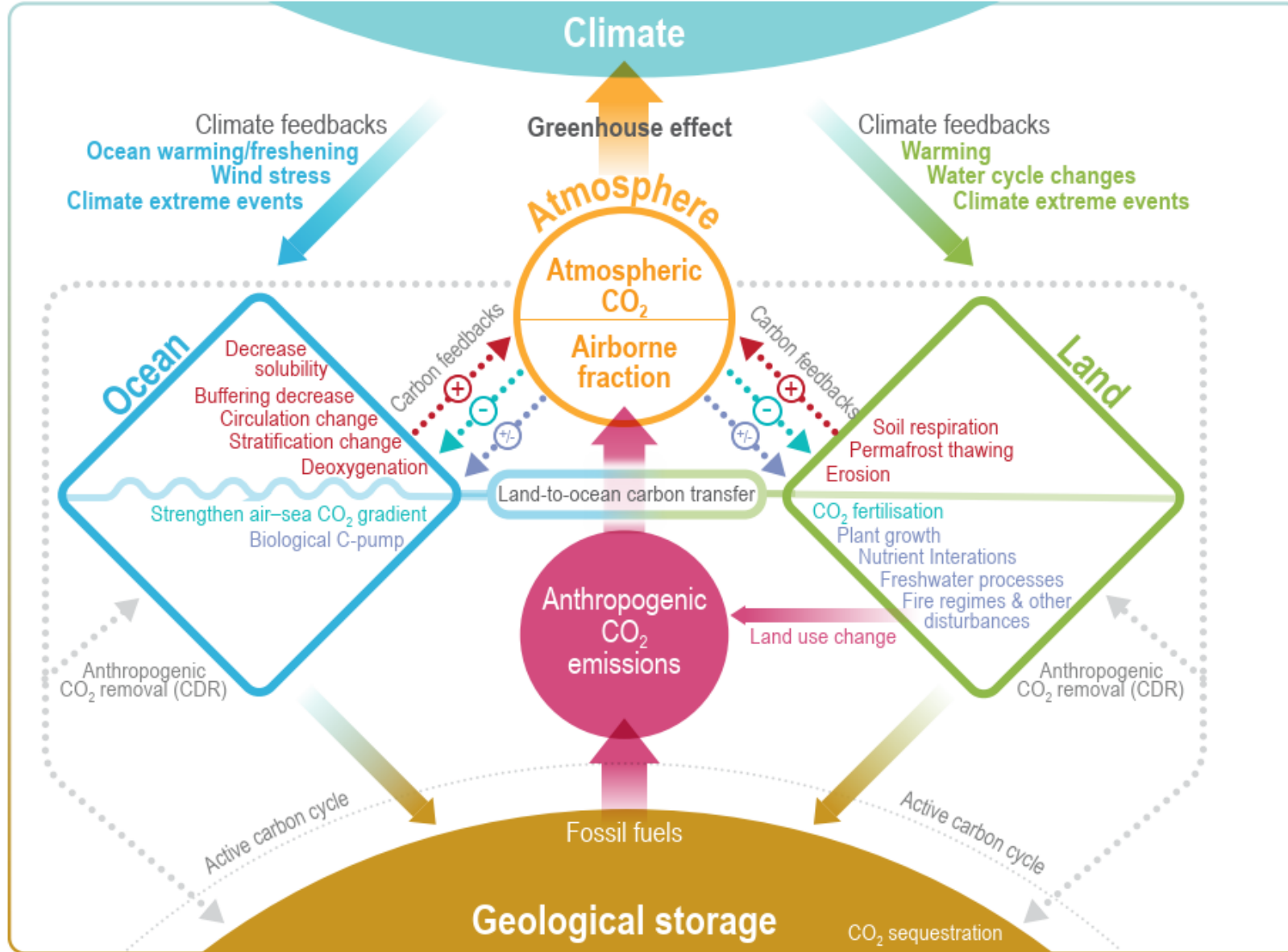
Global mean temperature near-term projections relative to 1986–2005



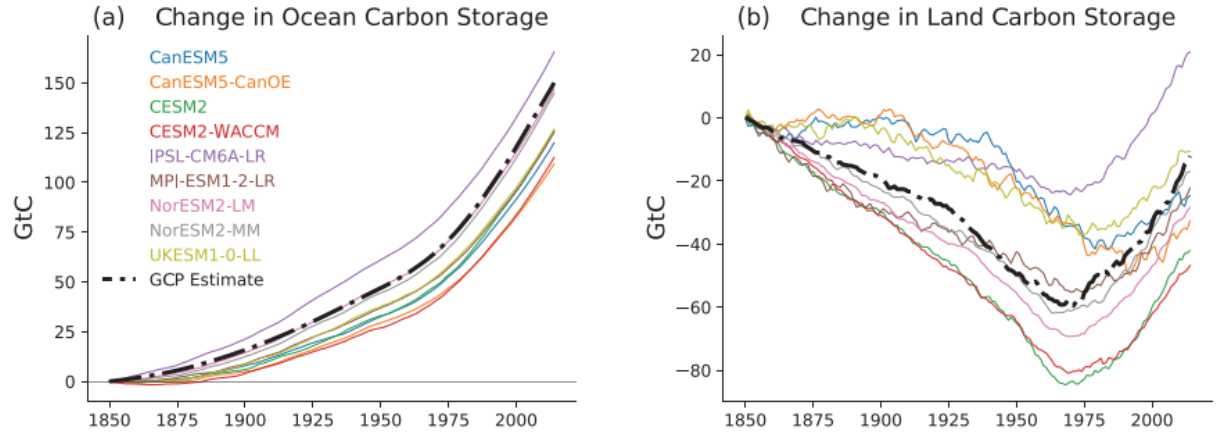
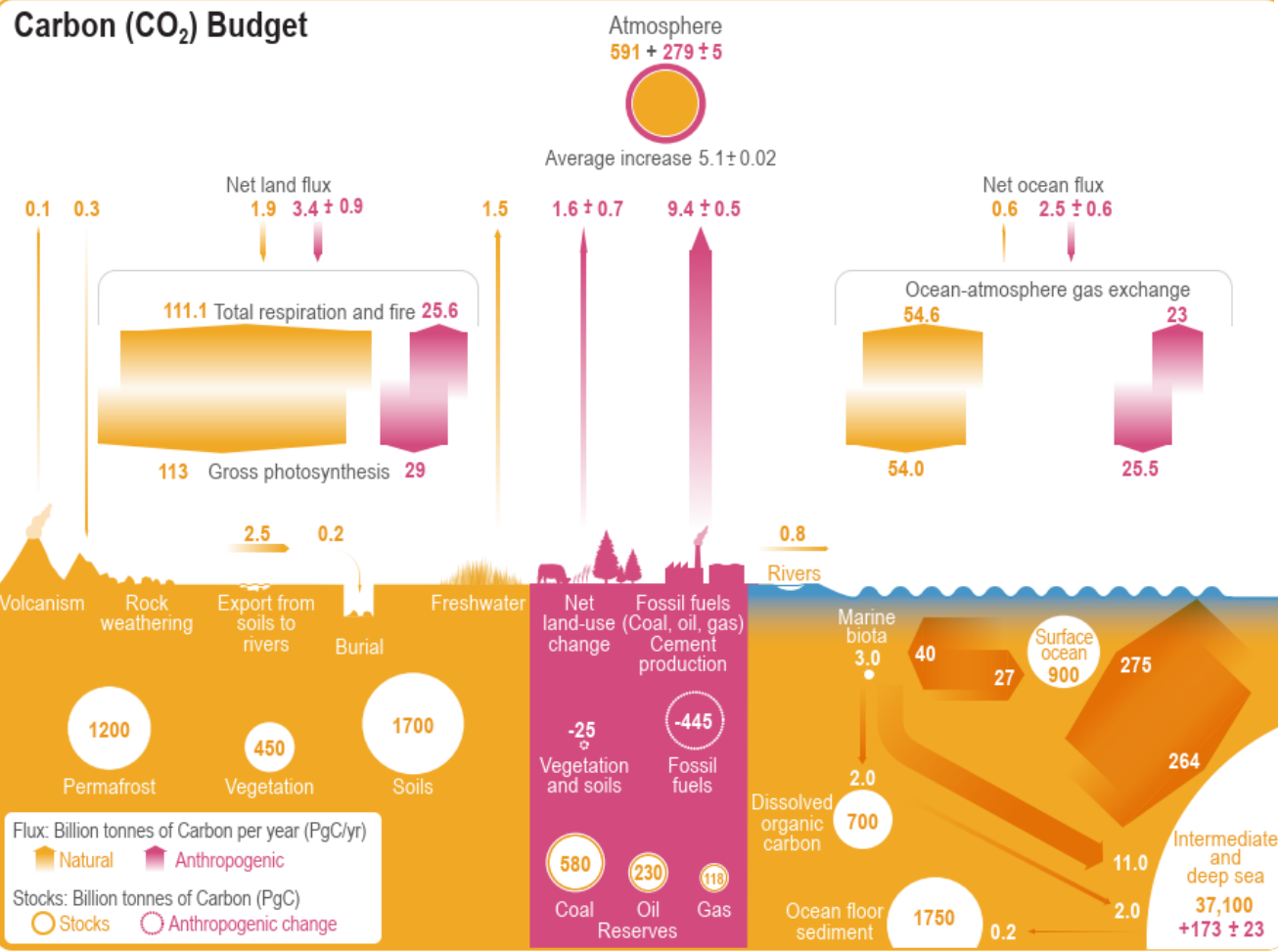
Pintalämpötilahavainnot vs. mallien antamat tulokset välillä 1998 - 2012 (IPCC 2014)

Takaisinkytkentäprosessit

Figure 5.2 | Key compartments, processes and pathways that govern historical and future CO₂ concentrations and carbon-climate feedbacks through the coupled Earth system. The anthropogenic CO₂ emissions, including land-use change, are partitioned via negative feedbacks (turquoise dotted arrows) between the ocean (23%), the land (31%) and the airborne fraction (46%) of anthropogenic CO₂ that sets the changing CO₂ concentration in the atmosphere (2010–2019; Table 5.1). This regulates most of the radiative forcing that creates the heat imbalance that drives the climate feedbacks to the ocean (blue) and land (green). Positive feedbacks (red arrows) result from processes in the ocean and on land (red text). Positive feedbacks are influenced by both carbon-concentration and carbon-climate feedbacks simultaneously. Additional biosphere processes have been included, but these have an as-yet-uncertain feedback impact (blue-dotted arrows). CO₂ removal from the atmosphere into the ocean, land and geological reservoirs, necessary for negative emissions, has been included (grey arrows). Although this schematic is built around CO₂ (the dominant greenhouse gas), some of the same processes also influence the fluxes of CH₄ and N₂O and the strength of the positive feedbacks from the terrestrial and ocean systems.



Hiilibudjetit, päästöt ja nielut

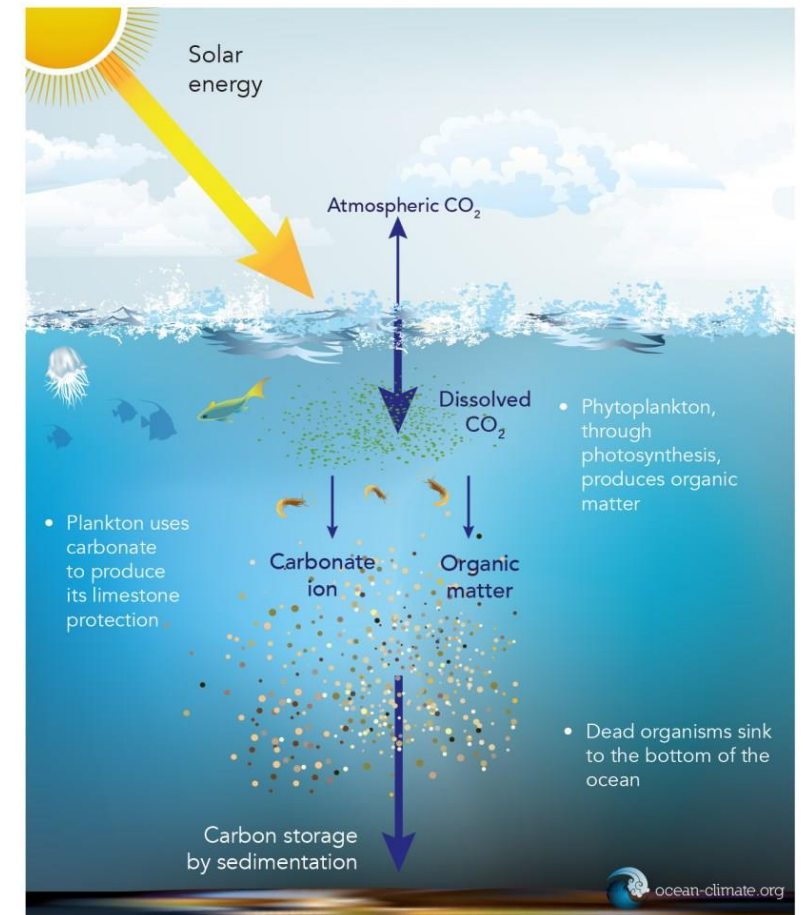


IPCC AR6, Climate Change
2021, Physical Science
Basis

Figure 5.12 | Global carbon (CO₂) budget (2010–2019). Yellow arrows represent annual carbon fluxes (in PgC yr⁻¹) associated with the natural carbon cycle, estimated for the time prior to the industrial era, around 1750. Pink arrows represent anthropogenic fluxes averaged over the period 2010–2019. The rate of carbon accumulation in the atmosphere is equal to net land-use change emissions, including land management (called LULUCF in the main text) plus fossil fuel emissions, minus land and ocean net sinks (plus a small budget imbalance, Table 5.1). Circles with yellow numbers represent pre-industrial carbon stocks in PgC. Circles with pink numbers represent anthropogenic changes to these stocks (cumulative anthropogenic fluxes) since 1750. Anthropogenic net fluxes are reproduced from Friedlingstein et al. (2020). The relative change of gross photosynthesis since pre-industrial times is based on 15 DGVMs used in Friedlingstein et al. (2020). The corresponding emissions by total respiration and fire are those required to match the net land flux, exclusive of net land-use change emissions which are accounted for separately. The cumulative change of anthropogenic carbon in the terrestrial reservoir is the sum of carbon cumulatively lost by net land-use change emissions, and net carbon accumulated since 1750 in response to environmental drivers (warming, rising CO₂, nitrogen deposition). The adjusted gross natural ocean-atmosphere CO₂ flux was derived by rescaling the value in Figure 1 of Sarmiento and Gruber (2002) of 70 PgC yr⁻¹ by the revised estimate of the bomb radiocarbon (¹⁴C) inventory in the ocean. The original bomb ¹⁴C inventory yielded an average global gas transfer velocity of 22 cm hr⁻¹; the revised estimate is 17 cm hr⁻¹ leading to 17/22*70=54. Dissolved organic carbon reservoir and fluxes from Hansell et al. (2009). Dissolved inorganic carbon exchanges between surface and deep ocean, subduction and obduction from Levy et al. (2013). Export production and flux from (Boyd et al., 2019). Net primary production (NPP) and remineralization in surface layer of the ocean from Kwiatkowski et al. (2020); Séférian et al. (2020). Deep ocean reservoir from Keppler et al. (2020). Anthropogenic carbon reservoir in the ocean is from Gruber et al. (2019b) extrapolated to 2015. Fossil fuel reserves are from BGR (2020); fossil fuel resources are 11,490 PgC for coal, 6,780 PgC for oil and 365 PgC for natural gas. Permafrost region stores are from Hugelius et al. (2014); Strauss et al. (2017); Mishra et al. (2021) (see also Box 5.1) and soil carbon stocks outside of permafrost region from Batjes (2016); Jackson et al. (2017). Biomass stocks (range of seven estimates) are from Erb et al. (2018). Sources for the fluxes of the land-ocean continuum are provided in main text and adjusted within the ranges of the various assessment to balance the budget (Section 5.2.1.5).

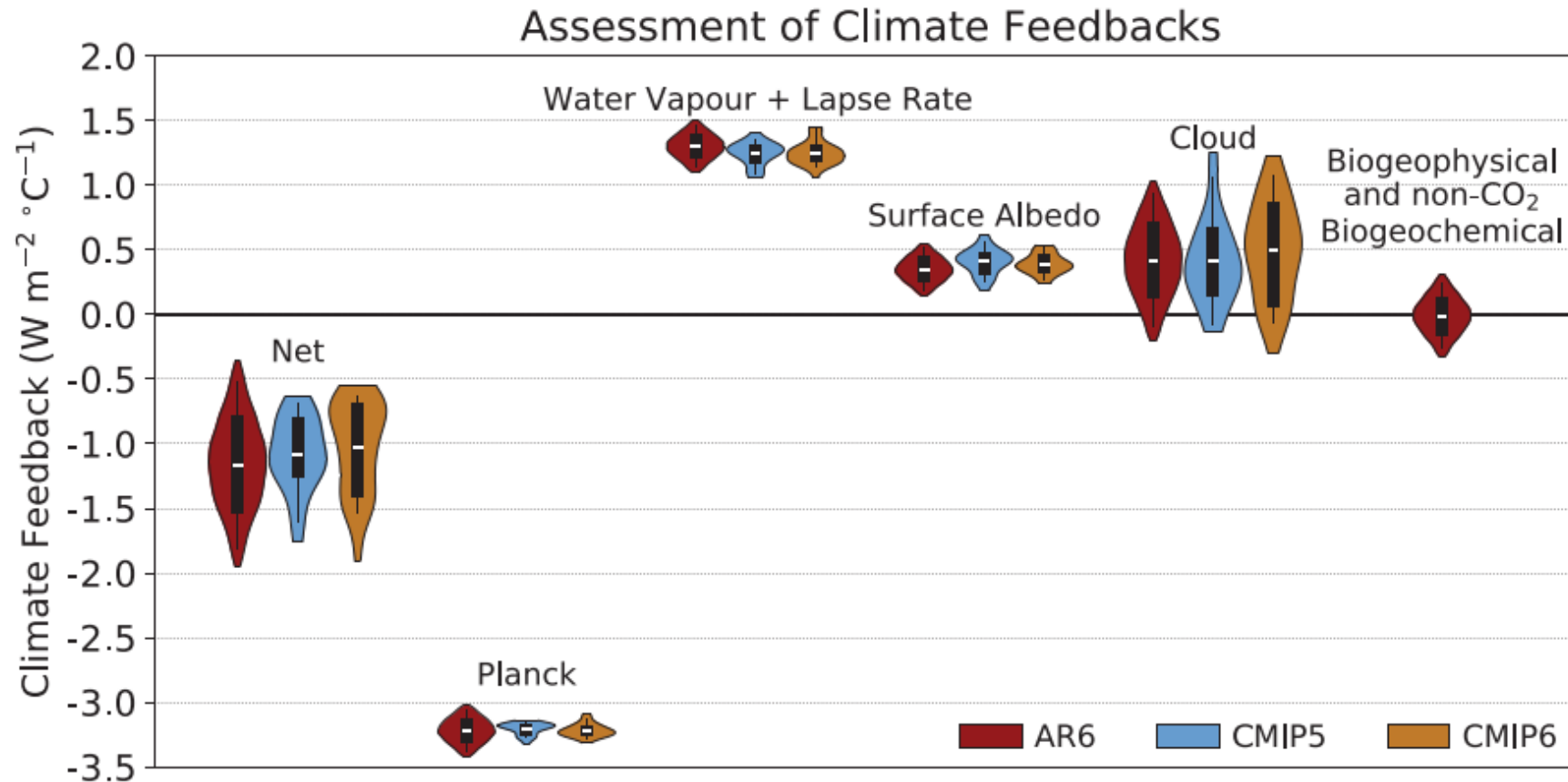
Veden kierron ja merien takaisinkytkennät

- Meriveden lämpeneminen ja hiilidioksidin määrän lisääntyminen
 - Vaikutukset merien kasviplanktoniin ja ekosysteemeihin => biologinen hiilipumppu => lämmittävä/viilentävä vaikutus
 - Hiilidioksidia liukenee vähemmän lämpimään veteen, mutta hiilidioksidin pitoisuus ilmassa vaikuttaa lopulliseen tasapainoon => lämmittävä/viilentävä vaikutus
 - Hiilidioksidin määrä vedessä lisääntyy => karbonisaatio lisääntyy => hiilinielu kasvaa
- Vesihöyryn määrä ilmakehässä kasvaa
 - Kasvihuoneilmiö vahvistuu => lämmittävä vaikutus
 - Pilvisyys voi lisääntyä (riippuu aerosoleista myös) => viilentävä/lämmittävä vaikutus
 - Sateiden lisääntyminen tietyillä alueilla => tulvat, kasvien kasvun nopeutuminen, hiilinielun kasvu => viilentävä vaikutus
- Kuivien alueiden lisääntyminen tietyillä alueilla => hiilinielu pienenee => lämmittävä vaikutus
- Jäätiköiden sulaminen
 - Albedon pieneneminen => lämmittävä vaikutus
 - Merenpinnan nousu => rannikoiden ekosysteemit => lämmittävä/viilentävä vaikutus
 - Termohaliinisen kierron muutokset (mm. Golf virran heikentyminen) => lämmittävä/viilentävä vaikutus



Biological carbon pump

Takaisinkytkennän parametrit (W/m²/C)

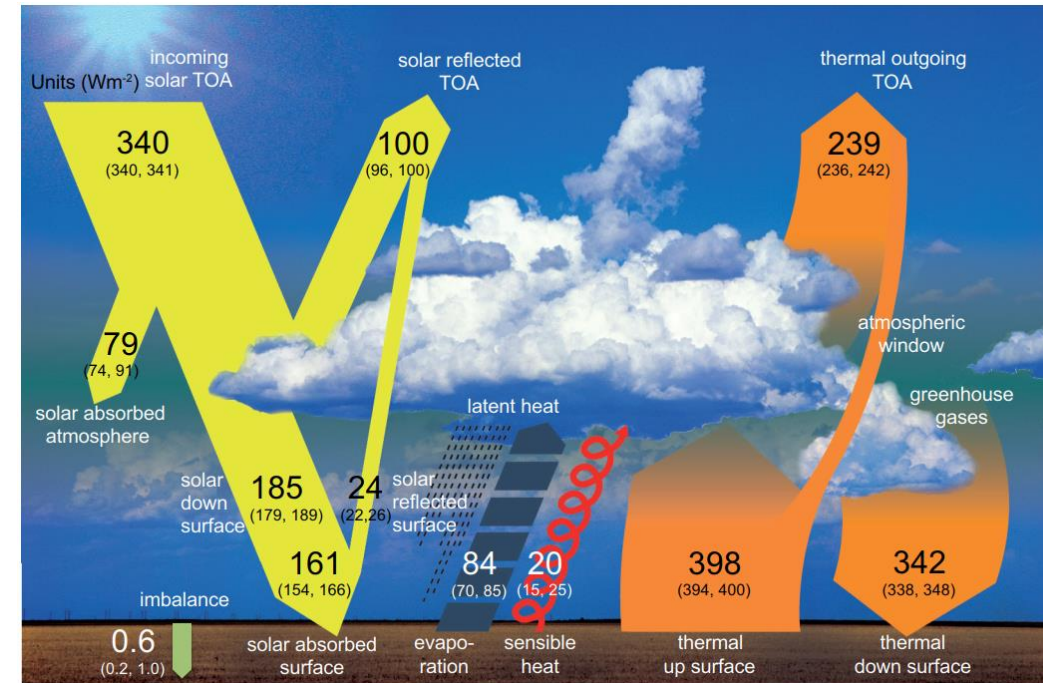


IPCC AR6, Climate Change 2021,
Physical Science Basis

Figure 7.10 | Global mean climate feedbacks estimated in *abrupt4xCO2* simulations of 29 CMIP5 models (light blue) and 49 CMIP6 models (orange), compared with those assessed in this Report (red). Individual feedbacks for CMIP models are averaged across six radiative kernels as computed in Zelinka et al. (2020). The white line, black box and vertical line indicate the mean, 66% and 90% ranges, respectively. The shading represents the probability distribution across the full range of GCM/ESM values and for the 2.5–97.5 percentile range of the AR6 normal distribution. The unit is W m⁻² °C⁻¹. Feedbacks associated with biogeophysical and non-CO₂ biogeochemical processes are assessed in AR6, but they are not explicitly estimated from general circulation models (GCMs)/Earth system models (ESMs) in CMIP5 and CMIP6. Further details on data sources and processing are available in the chapter data table (Table 7.SM.14).

Yhteenvetoa ilmastosteemikoulutuksesta

- 1) Mitä historia opettaa: Maapallon pintalämpötila tällä hetkellä samaa luokkaa kuin n. 6000 vuotta sitten nykyisellä Holoseeniajalla
- 2) Ilmaston lämpötilaan vaikuttavat keskeiset tekijät:
 - Auringon säteilyn muutokset
 - Albedo (pilvet, maanpinta)
 - Aerosolihiukkaset (BC, CCN, IN)
 - Ilmakehän absorptio (vesi, hiilidioksidi, metaani, ...)
 - Ilmakehän herkkyysparametri (λ) = ”takaisinkytkennät”
- 3) Ilmaston takaisinkytkentämekanismi ovat hyvin moninaisia, ja ne voivat joko kiihdyttää tai jarruttaa ilmaston lämpenemistä. Tällä hetkellä nettovaikutus on negatiivinen.
- 4) Ilmastomallit sisältävät vielä melko paljon epävarmuuksia, joita pitäisi saada pienennettyä, jotta ennusteet ja niiden vaikutukset poliittisiin päätöksiin, markkinatalouteen ja jokaisen ihmisen arkeen olisivat kestäväällä pohjalla



(Kuva: IPCC, 2014)

Pohdittavaa

- Ilmastonmuutos ja sen takaisinkytkentämekanismit on valtavan laaja, monimutkainen ja dynaaminen kokonaisuus, jota on hankala mallintaa, ymmärtää ja opettaa. Miten siitä saisi paremmin kopin?
- Uutta tietoa ja ymmärrystä saadaan koko ajan lisää, mutta monet prosessit sisältävät edelleen paljon epävarmuutta. Miten hallitsemme tiedon tulvaa ja miten pystymme toiminaan tällä kaltevalla pinnalla?
- Kokonaisuuden ymmärtäminen on avainasemassa, kun pohditaan erilaisia ratkaisuja ja niiden päästöjä mm. energiatuotannossa, maa- ja metsätaloudessa, maankäytössä, liikenteessä, kalastuksessa ym.
- Voidaanko luonnollisia ilmaston lämpenemistä hidastavia takaisinkytkentäprosesseja tehostaa ja liittykö niihin riskejä? Esim. metsittäminen, soiden ennallistaminen, aerosolihiukkasten ruiskuttaminen yläilmakehään.
- Yhtenä valopilkuna on hiljattain uutisissa mainitun ison valliriutan tilanne, eli se on tällä hetkellä laajimmillaan kaikkien aikojen mittauksissa. Eli luonto pystyy myös eheytymään, kun tehdään oikeita toimenpiteitä.

Pohdintakysymyksiä (pienryhmissä)

Millaisia haasteita/tarpeita/kysymyksiä teillä on noussut esiin seuraaviin teemoihin liittyen?

1. Oman osaamisen päivittäminen ja ilmastoon liittyvän kokonaisuuden hahmottaminen takaisinkytkentöineen.
 - Ymmärräkö kokonaisuuden vai onko se sekamelska yksittäisiä ilmiöitä?
 - Mikä auttaisi kokonaisuuden hahmottamisessa?
 - Aika, kannustimet, koulutuksen ja aiheeseen liittyvän materiaalin saatavuus.
2. Ilmastoteemaan liittyvän tiedon etsintä ja luotettavuuden arviointi.
 - Miten tiedon lähteen tausta vaikuttaa luotettavuuteen?
 - Mitkä ovat luotettavia lähteitä?
 - Miten erotan ilmastosta johtuvat ongelmat muista ihmisen aiheuttamista paikallisista ympäristöongelmista?
3. Ilmastonmuutoksen medialukutaito.
 - Miten erotan faktat mielipiteistä ja tulkinnoista?
 - Miten hahmotan tunnepohjaisen ja faktapohjaisen argumentoinnin?
 - Mitä tulevaisuuden uhkakuvat vaikuttavat median/omaan/someryhmän käyttäytymiseen?
4. Ilmastohaasteiden ja ratkaisujen sisällyttäminen omaan opetukseen.
 - Mitä aiheita valitsen ja miksi?
 - Miten voin vahvistaa tulevaisuuden toivon näköalaa?

Kaikkia näitä teemoja käsitellään syvemmin OPH:n koulutuksessa. Ilmoittaudu mukaan!