

# Jääkausiajan ilmasto

Juha Pekka Lunkka

Poikkeuksellisen leudon talven keskellä on paikallaan muistuttaa, että geologisesti ajatellen elämme jääkautta eli erittäin kylmää vaihetta, jääkausiaikaa maapallon ilmastohistoriassa. Tämä kylmä ilmastovaihe on kestänyt jo noin 52 miljoonaa vuotta, ja vaikka maapallon ilmasto muuttuu kvasisyklisesti kymmenien ja satojentuhansien vuosien periodeilla ja osittain kaoottisesti vain muutamien kymmenien, satojen ja tuhansien vuosien aikana, maapallon ilmasto säätelevien ulkoisten pakotteiden suhteen ei lähivuosisimuljoonina ole nähtävissä mitään sen kaltaisia tekijöitä, joiden tuloksena maapallon pitkäaikainen ilmastokehitys muuttuisi merkittävästi.

Ilmaston muutokset ovat seurausta maapalloon kohdistuvien ulkoisten ja sisäisten pakotteiden ja sisäisten kytkentöjen aiheuttamista muutoksista maapallon ilmakehässä, jään määrässä, merivedessä ja mantereisten alueiden laajuudessa sekä kasvillisuudessa. Pitkällä aikavälillä maapallon ilmasto säätelevät ulkoiset pakotteet liittyvät maan kiertoradan ja maapallon aseman jaksollisiin muutoksiin suhteessa Aurinkoon sekä laattatektoniikkaan ja Auringon säteilyintensiteetin vaihteluihin.

Niin sanotut orbitaaliset seikat eli maan kiertoradan ja maapallon aseman jaksolliset muutokset suhteessa Aurinkoon vaikuttavat maan yläilmakehään saapuvan energian määrään ja sen jakautumiseen maapallolla. Orbitaaliset muutokset tapahtuvat aikajaksoilla, jotka ovat kymmenisätuhansista (prekessiojako noin 43 000 vuotta, huojuntajakso noin 21 000 vuotta) sataantuhanteen vuoteen (eksentrisyysjako noin 100 000 vuotta). Muutokset Auringon aktiivisuudessa vaikuttavat myös Auringosta maahan tulevaan säteilymäärään. Koko maapallon historian, eli noin 4,55 miljardin vuoden ajan, Auringon säteilymäärä on hitaasti kasvanut ja toisaalta Aurin-

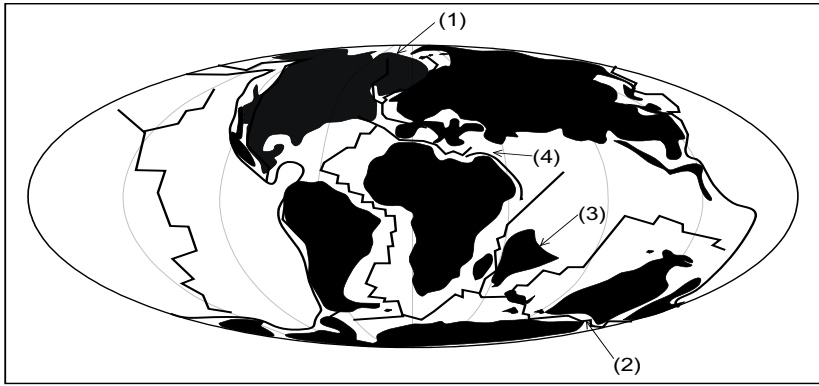
gon aktiivisuudessa tapahtuu myös merkittäviä muutoksia paljon lyhyemmällä, kymmenien, satojen, tuhansien vuosien aikavälillä.

Vaikka orbitaaliset seikat vaikuttavat jaksollisesti kylmien ja lämpimien ilmastovaiheiden vuorotteluun maapallolla, maapallon ilmastokehityksen kannalta laattatektoniset syyt eli mantereisten alueiden sijainti ja liike maapallolla eri geologisina aikakausina ja mannerten liikuntoihin liittyvä vuoristojen muodostuminen on yksi perustekijä, joka on merkittävästi säädellyt maapallon ilmastokehitystä vuosimiljoonien aikaperspektiivissä.

## *Lämpimien ja kylmien kausien vaihtelu*

Jos tarkastelemme geologisen aineiston avulla millainen maapallo ja sen ilmasto oli Liitukaudella noin 100–80 miljoonaa vuotta sitten verrattuna nykyiseen on selvää, että mantereiden asema maapallolla oli erilainen kuin tänä päivänä. Myöhäis-liitukaudella Pohjois-Atlantti ei ollut vielä avautunut ja Eurooppa, Grönlanti ja Pohjois-Amerikan itäosa olivat vain kapeiden salmien ja matalan veden erottamina toisistaan. Australia ja Etelämanner olivat lähes yhtä mannerta, Intian mannerlaatta sijaitsi Madagaskarin luoteispuolella ja nykyisellä Välimerellä eli silloisella Tethys-merialueella oli yhteys sekä Intian Valtamereen että Keski-Atlantille (*Kuva 1*). Liitukauden aikana jäätiköitä ei esiintynyt maapallolla ja osaksi tästä syystä merenpinta oli yli 200 m korkeammalla kuin nyt (esim. *Barron et al.* 1981, *Hallam* 1984).

Myöhäis-liitukautinen fossiiliaineisto puolestaan osoittaa, että sekä pohjoisella että eteläisellä napa-alueella eli kilpikonnia, krokotiilejä ja dinosauruksia ja koralleja esiintyi yleisesti aina 40 leveysasteille saakka (esim. *Stanley* 1998). Mallit, jotka pohjautuvat geologiseen ja paleontologi-



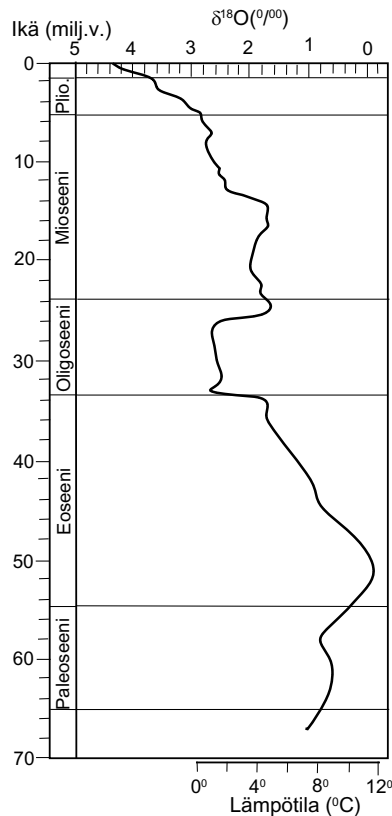
seen aineistoon osoittavat, että maapallon napa-alueilla lämpötila oli keskimäärin 20–40 °C korkeampi, mutta ekvaattorialueella vain muutama aste korkeampi kuin nykyään (esim. *Ruddiman* 2002). Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus oli vähintään 4–5 kertaa suurempi kuin tänä päivänä ja kaiken kaikkiaan lämpötilagradientti napa-alueiden ja päiväntasaajan välillä oli pieni (*Barron & Washington* 1985). Liitukaudella vallitsi todellinen kasvihuoneilmasto verrattuna ilmastoon, joka tänä päivänä vallitsee maapallolla.

Paleoilma-aineisto Deep Sea Drilling ja Ocean Drilling projektien aikana kairatuista merisedimenttisarjoista osoittaa yksiselitteisesti sen, että viimeisen noin 52 miljoonan vuoden aikana maapallon ilmasto on muuttunut dramaattisesti kylmempään suuntaan verrattuna aikaisemman liitukauden kasvihuoneilmastoon (*Kuva 2*). Toisaalta maapallon ilmasto on ainakin viimeisen 52 miljoonan vuoden aikana luonnehtinut jatkuva orbitaalisisistä seikoista johtuva syklinen vaihtelu lämpökausien ja kylmien kausien välillä, joiden kesto on vaihdellut kymmenistä tuhansista sataantuhanteen vuoteen.

Merisedimenteistä analysoitujen kalkkikuoristen yksisoluisten eläinten, foraminiferojen happi-isotooppi 18 ja happi-isotooppi 16 suhde, joka

*Kuva 2. Syvänmeren kairausaineistosta analysoitujen fossiilisten yksisoluisten foraminiferojen kalkkikuoren happi-isotooppisuhteen (O-18 / O-16) muutos viimeisen n. 70 miljoonan vuoden ajalta osoittaa, että maapallon ilmasto on viilentynyt selvästi viimeisen 52 miljoonan vuoden aikana. Happi-isotooppisuhte ( $\delta^{18}\text{O}$ ) kuvaistaa meriveden (tässä tapauksessa pohjalta olevan meriveden) lämpötilan muutosta ja toisaalta jäätiköiden määrän muutosta maapallolla 70 Ma:n aikana (muokattu *Zachos et al.* 2001 mukaan).*

*Kuva 1. Mantereiden sijainti Liitukauden loppupuolella noin 80 miljoonaa vuotta sitten, jolloin Eurooppa, Grönlanti ja Pohjois-Amerikan itäosa olivat vain kapeiden salmien ja matalan veden erottamina toisistaan (1). Australia ja Etelämanner olivat lähes yhtä mannerta (2), Intian mannerlaatta sijaitsi Madagaskarin luoteispuolella (3) ja nykyisellä Välimerellä eli silloisella Tethys-merialueella oli yhteys sekä Intian Valtamereen että Keski-Atlantille (4) (muokattu *Stanley* 1989 mukaan).*



kertoo syvän meriveden lämpötilamuutoksista ja jäätikköjään määrästä maapallolla, osoittaa että Varhais-Eoseenin lämpömaksimin (noin 52 miljoonaa vuotta sitten) jälkeen maapallon ilmasto alkoi tasaisesti kylmetä ja valtamerien pohjalla olevan merivesi jäähtyi 8 °C noin 12 miljoonassa vuodessa (Kuva 2). Ilmaston kylmenemisen seurauksena manneralueille alkoi muodostua jäätikköjä noin 36 miljoonaa vuotta sitten ja ilmaston raju kylmeneminen noin 34 miljoonaa vuotta sitten aiheutti laajojen jäätiköiden muodostumisen Etelämantereelle, missä jäätiköt ovat säilyneet yhtäjaksoisesti näihin päiviin saakka.

Ilmasto pysyi suhteellisen vakaana aina Myöhäis-Oligoseeniin asti, mutta lämpeni selvästi noin 24 miljoonaa vuotta sitten. Nopea kylmeneminen tapahtui seuraavan kerran Keski-Mioseenissa noin 15 miljoonaa vuotta sitten ja siitä lähtien maapallon ilmasto on viilentynyt koko ajan aiheuttaen suurien mannerjäätiköiden muodostumisen pohjoiselle pallonpuoliskolle noin 3 miljoonaa vuotta sitten.

### Laattatektoniikka avainasemassa

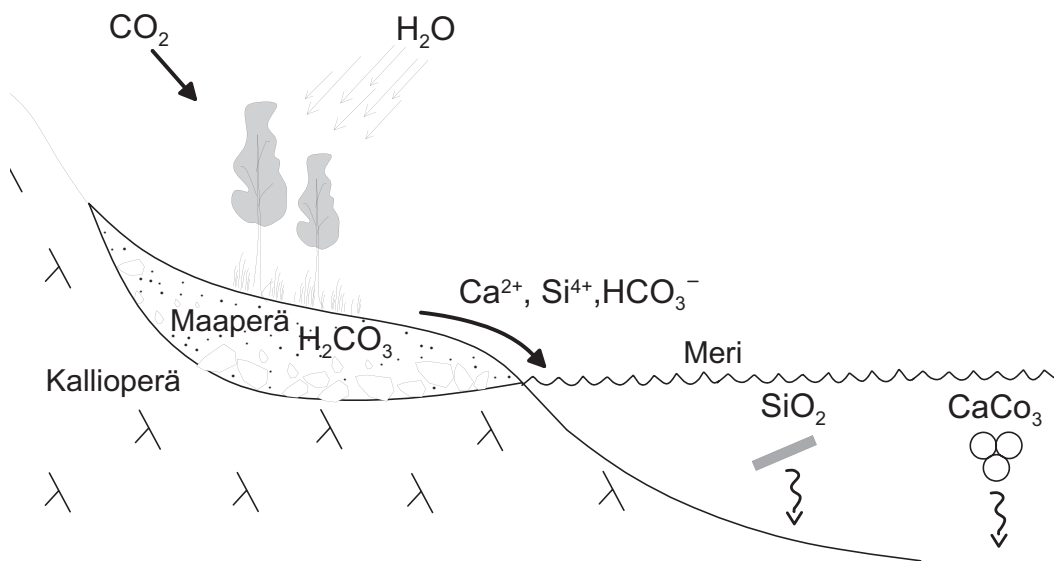
Miksi maapallon ilmasto on viilentynyt Liitukauden lopulta aina tähän päivään saakka? Nykyisen käsityksen mukaan pitkäaikaisen kylmenemisen syyt liittyvät laattatektoniikkaan ja sen seurauksena tapahtuvaan orogeeniaan eli vuorenmuodostukseen. Laattatektonisilla tapahtumilla on yhteys ilmakehän hiilidioksidipitoisuuteen ja laattatektoniset tapahtumat aiheuttavat myös

muutoksia mantereiden sijainnissa ja vaikuttavat lämpöä kuljettavien merivirtojen syntyyn, reitteihin ja lämmön jakautumiseen maapallolla.

Viimeisen 52 miljoonan vuoden aikana on tapahtunut muutamia ilmastokehityksen kannalta merkittäviä laattatektonisia tapahtumia, jotka ovat aiheuttaneet ilmaston pitkäaikaisen kylmenemiskehityksen. Raymon ja Ruddimanin (1992) mukaan näistä tapahtumista merkittävin on Intian laatan törmäminen Euraasian laattaan. Tämä törmäys, joka alkoi noin 55 miljoonaa vuotta sitten, on aiheuttanut Himalajan vuorijonon ja Tiibetin ylängön synnyn. Himalajan ja Tiibetin ylängön kohoaminen on kasvattanut merkittävästi mantereista rapautuvaa kalliopintaa.

Koska rapautuvaa pinta-alaa on syntynyt merkittävästi enemmän kuin Liitukauden aikana, on rapautumisintensiteetti maapallolla suhteellisesti kasvanut. Rapautumisintensiteetti säätelee puolestaan maapallon ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta pitkällä aikavälillä (Kuva 3) siten, että kun mantereiset, kallioperässä olevat silikaattimineraalit rapautuvat ne kuluttavat ilmakehän hiilidioksidia ja hiilidioksidipitoisuuden lasku ilmakehässä aiheuttaa ilmaston viilenemi-

*Kuva 3. Rapautumisintensiteetti säätelee pitkällä aikavälillä ilmakehän hiilidioksidipitoisuutta. Kun mantereisten kivien silikaattimineraalit rapautuvat ilmakehän hiilidioksidin ja sadeveden muodostaessa happamia liuoksia maannoksessa liuenneet ionit huuhtoutuvat meriin, jossa planktoneliöstö käyttää niitä kuoriensa rakennusaineiksi.*



sen. Rapautumistuotteet kulkeutuvat mantereilta jokikuljetuksen mukana meriin ja sitoutuvat puolestaan merieliöstön pii- ja kalkkikuoriin. Merieliöstön kuollessa kuoriin sitoutunut kalsiumkarbonaatti hautautuu merien pohjasedimentteihin ja osa kalsiumkarbonaatista liukenee myös meriveteen.

Tiibetin ylängön ja Himalajan synnyn ohella muut laattatektoniset prosessit, jotka ovat vaikuttaneet maapallon ilmastoon pitkällä aikavälillä liittyvät meriväyliä avautumiseen ja sulkeutumiseen, sillä meriväylät yhdistävät ja eristävät valtamerialtaita ja aiheuttavat näin ollen merivirtojen uudelleenjärjestäytymisiä. Etenkin muutamilla meriväyliä avautumisilla ja sulkeutumisilla katsotaan olevan suuri merkitys maapallon ilmastokehitykseen viimeisen 50 miljoonan vuoden aikana.

Noin 45 miljoonaa vuotta sitten Draken salmen muodostuttua, Etelämantereen ja Etelä-Amerikan välillä alkoi Atlantin valtameren ja Tyynen Valtameren vedet sekoittua (Scher & Martin 2006). Noin yksitoista miljoonaa vuotta myöhemmin (noin 34 miljoonaa vuotta sitten) Australian mantereen ja Etelämantereen välille syntyi ns. Tasmanian portti, jonka synnyn jälkeen Etelämantereen on ollut syvän meren ympäröimänä (esim. Kennett & Exon 2004). Näiden kahden salmen avautuminen oli edellytys sille, että syntyi kylmä Etelämannerta kiertävä merivirta niin sanottu Antarctic Circumpolar Current. Tämän merivirran muodostumisella on ollut vaikutus globaaliin ilmaston kylmenemiseen, joka happiisotooppikäyrässä näkyy selvänä hyppäyksenä happiisotooppiarvoissa noin 34 miljoonaa vuotta sitten (Kuva 2).

Kylmän merivirran synnyllä on mitä ilmeisimmän ollut vaikutus sekä jäätiköiden kasvuun Etelämantereella että termohaliiniseen meriveden kiertoon. Näiden tapahtumien lisäksi Tethysmeren sulkeutuminen nykyisen Välimeren itäosassa on vaikuttanut suuremman lämpötilagradientin muodostumiseen napa-alueiden ja polaarialueiden välillä. Myös Panaman kannaksen synnyllä noin 4 miljoonaa vuotta sitten on oletettu olleen suuri vaikutus ilmastomuutokseen pohjoisella pallonpuoliskolla.

Maapallon ilmasto on siis selvästi viilenty-nyt vuosisiljoonien saatossa ja syynä tähän voidaan pitää lähinnä laattatektonisia tapahtumia,

jotka ovat aiheuttaneet hiilidioksidipitoisuuden laskun ilmakehässä. Toisaalta merivirtojen uudelleen järjestäytymisen seurauksena lämmön johtuminen polaarille alueille on vähentynyt.

Pitkäaikaisen viilenemisen ohella 52 miljoonan vuoden jääkausiaikaa luonnehtii lyhyempikeskiset lämpimien ja kylmien kausien vuorottelet orbitaalisten syklien tahdissa ja myös todella nopeat ilmastomuutokset, jotka liittyvät nopeisiin muutoksiin mm. jäätiköiden dynamiikassa, jään määrässä, merivedessä, kasvillisuudessa ja ilmakehän koostumuksessa.

## KIRJALLISUUTTA

- Barron, E. J., Thompson, S. L. & Schneider, S. H. (1981): "An Ice Free Cretaceous? Results from a Model Simulations." *Science* 212, 501–508.
- Barron, E. J. & Washington, W. M. (1985): "Warm Cretaceous Climates: High Atmospheric CO<sub>2</sub> as a Plausible Explanation." Teoksessa Sundqvist, E. T. & Broecker, W. S. (Toim.) *The Carbon Cycle and Atmospheric CO<sub>2</sub>: Natural Variations, Archaeans to Present*. *Geophysical Monograph* 32, 546–553. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Hallam, A. (1984): "Pre-Quaternary Sea Level Changes." *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 12, 205–243.
- Raymo, M. E. & Ruddiman, W. F. (1992): "Tectonic forcing of late Cenozoic climate." *Nature* 359, 117–122.
- Ruddiman, W. F. (2002): *Earth's Climate Past and Future*. W. H. Freeman and Company, New York. 465 pp.
- Kennett, J. P. & Exon, N. F. (2004): "Paleoceanographic evolution of the Tasmanian Seaway and its climatic implications". *Geophysical Monograph* 151, 345–367. American Geophysical Union, Washington D.C.
- Scher, H. D. and Martin, E. E. (2006): "Timing and Climatic Consequences of the Opening of Drake Passage". *Science* 312, 428–430.
- Stanley, S. M. (1989): *Earth and Life Through Time*. W. H. Freeman and Company, New York. 689 pp.
- Zachos, J., Pagani, M., Sloan, L., Thomas, E., Billups, K. (2001): "Trends, Rhythms, and Aberrations in Global Climate 65 Ma to Present." *Science* 292, 686–693.

*Kirjoittaja on Oulun yliopiston maaperägeologian professori ja Helsingin yliopiston geologian ja paleontologian dosentti. Artikkelin perustuu Suomalaisen Tiedeakatemian kokouksessa 4.9.2006 pidettyyn esitelmään.*