



TEKNILLINEN TIEDEKUNTA

LUONNOLLISTEN PROSESSIEN VAIKUTUKSET ILMASTON MUUTOKSIIN

Jenni Heinonen

GEOTIETEIDEN TUTKINTO-OHJELMA

Kandidaatintyö

(11/2024)

TIIVISTELMÄ

Luonnollisten prosessien vaikutukset ilmaston muutokseen

Jenni Heinonen

Oulun yliopisto, Geotieteiden tutkinto-ohjelma

Kandidaatintutkielma s. 28

Työn ohjaaja(t) yliopistolla: Juha Pekka Lunkka

Tässä tutkielmassa käsitellään maapallolla luonnollisesti esiintyvien prosessien sekä maan ulkopuolella vallitsevien voimien vaikutuksia maapallon ilmaston muutokseen. Tutkielmassa perehdytään astronomisiin tekijöihin, maapallon sisäisiin kiertokulkuihin ja ilmastojärjestelmiin, sekä niiden vuorovaikutuksiin.

Maan ilmastojärjestelmä on monimutkainen systeemi, jota maapallolla luonnollisesti esiintyvät ilmiöt ohjailevat. Ilmastonmuutoksen tutkiminen etenkin menneiden ilmasto-olosuhteiden kautta voi valaista tulevia ilmaston vaihteluita ja niiden seurauksia. Yleiskäsityksenä on, että ilmastonmuutos tarkoittaa ihmistoiminnan aiheuttamaa ilmaston lämpenemistä. Ilmastonmuutostutkimuksilla on voitu osoittaa ihmistoiminnalla olevan vaikutus muun muassa ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksien nousuun, mutta ilmasto on kuitenkin muuttunut maapallolla koko sen historian ajan ja on jatkuvassa muutoksessa edelleen.

Avainsanat: ilmastonmuutos, ilmasto, ilmastosysteemi, kiertokulku

Sisällysluettelo

1 JOHDANTO	4
2 ULKOISET PAKOTTEET	5
2.1 Astronomiset tekijät	5
2.1.1 Milankovitchin syklit.....	5
2.1.2 Auringon aktiivisuus.....	8
3 MAAPALLON SYSTEEMIT JA ILMASTO	11
3.1 Aineen geologinen kiertokulku	11
3.1.1 Litosfääri ja laattatektoniikka	11
3.1.2 Laattatektoniikan vaikutukset globaaliin ilmastoon	13
3.1.3 Rapautumisprosessit	14
3.2 Kryosfääri ja jäätiköiden vaikutus ilmastoon.....	15
3.3 Hydrosfääri ja veden kiertokulku.....	16
3.3.1 Pintamerivesien ja termohaliinisen kierron vaikutukset ilmastoon	17
3.4 Atmosfääri.....	19
3.4.1 Ilmakehän merkitys ilmastomuutoksessa	21
3.5 Biosfääri ja hiilen kiertokulku.....	22
3.5.1 Jääkairanäytteet hiilidioksidipitoisuuksien määrittämisessä	23
4 YHTEENVETO	25
LÄHDELUETTELO	27

1 JOHDANTO

Maapallon ilmasto on maapallolla sekä maan ulkopuolella luonnollisesti esiintyvien ilmiöiden kautta syntyvä kokonaisuus. Ilmastojärjestelmään vaikuttavat maapallon eri kehät; litosfääri (kivikehä), kryosfääri (lumen ja jään peittämät alueet), biosfääri (elollisen aineen kehä), hydrosfääri (vesikehä), sekä atmosfääri (ilmakehä). Maapalloon kohdistuvilla orbitaalilla voimilla sekä auringolla on vaikutus kehien toimintaan ja siten myös ilmastoon. Nämä maan sisäiset ja ulkoiset ilmiöt säätelevät ilmastoa, joka on vaihdellut maapallolla koko sen olemassaolon ajan.

Ilmastomuutoksella tarkoitetaan maapallon hitaasti tapahtuvia ilmaston vaihteluita. Ilmastomuutos eroaa säätilan muutoksista siten, että säässä tapahtuvat muutokset ovat usein lyhytaikaisia, muutamasta päivästä korkeintaan kuukausiin, kun ilmastossa tapahtuvat muutokset ovat vähintään muutamien kymmenien vuosien aikana tapahtuva pitkäaikainen muutos. Yleinen käsitys ilmastomuutoksesta on teollisen vallankumouksen jälkeen alkanut aika, jolloin ihminen alkoi hyödyntää fossiilisia polttoaineita (Lunkka 2008). Ilmastopaneeli IPCC:n raportin mukaan ilmakehän hiilidioksidipitoisuudet ovat ennätyskorkeat ja vuonna 2019 pitoisuudet kohosivat noin 410 ppm:n (parts per million), kun ennen 1750-lukua ne olivat noin 280 ppm (IPCC 2023; NOAA 2024).

Ilmastomuutosta tutkiessa on tärkeää ymmärtää maapallon ilmastohistoriaa ja menneitä ilmasto-olosuhteita, jotta voidaan arvioida tulevia ilmaston vaihteluita. Geologisista kerrostumista on havaittu ilmaston radikaalisti kylmenneen ja lämmenneen jo viimeiset 2,6 miljoonaa vuotta. Antarktikselta kairatuista jäänäytteistä mitattujen hiilidioksidipitoisuuksien on todettu korreloivan kylmien ja lämpimien aikakausien kanssa viimeiset 800 000 vuotta, jotka seuraavat myös maapallon kohtaamia orbitaalisia voimia noin 100 000 vuoden sykleissä (Kuva 10). Hiilidioksidipitoisuudet ja maapallon keskilämpötila ovat nousseet hyvin nopeasti maan luonnolliseen sykliin nähden ja tämän on todettu johtuvan yksinomaan ihmisen aiheuttamista päästöistä (IPCC 2023). Ilmasto ei kuitenkaan ole koskaan ollut vakaassa tilassa ja on kykeneväinen muuttumaan nopeammin ja kohtalokkaammin, kuin aiemmin ihmisen historian aikana (Lunkka 2008).

2 ULKOISET PAKOTTEET

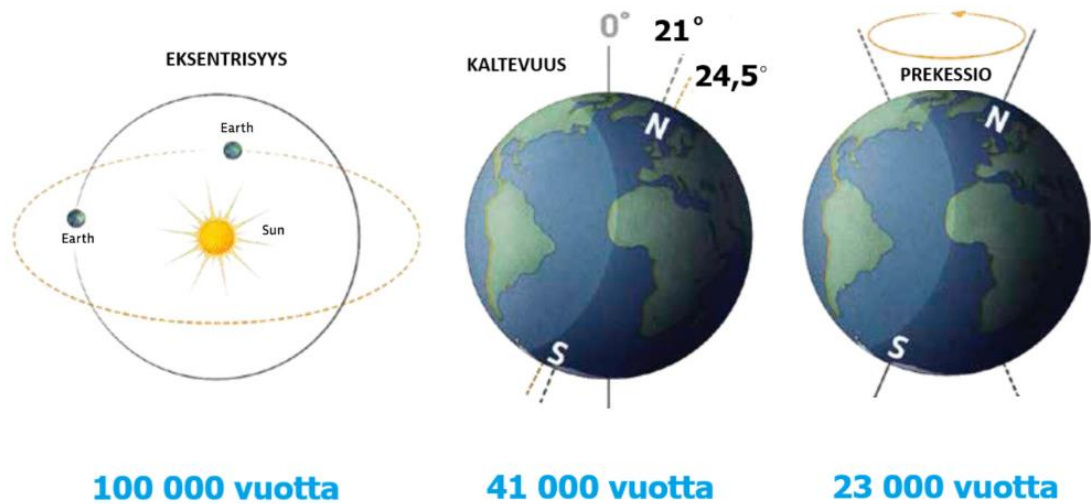
Maapallon sisäisiä järjestelmiä ohjailee osittain myös maapallon ulkopuoliset tekijät. Aurinko ja sen maahan ulottuva säteily on yksi maapallon energianlähteistä, jolla on vaikutus ilmaston vaihteluihin maan sisäisten prosessien kautta. Auringon lisäksi myös muut sitä kiertävät taivaankappaleet vaikuttavat maapallon orbitaaliseen käyttäytymiseen ja sitä mukaa ilmasto-olosuhteisiin.

2.1 Astronomiset tekijät

2.1.1 Milankovitchin syklit

Maan sisällä tapahtuvien muutosten lisäksi ilmastoon vaikuttavat myös maan ulkopuoliset tekijät. Serbialaisen matemaatikon ja geofyysikon Milutin Milankovitchin teorian mukaan ilmastoon vaikuttavat seuraavat astronomiset tekijät: maan kiertoradan eksentrisyyden vaihtelu, maan akselin kaltevuuskulman vaihtelu, sekä akselin prekessioliike. Yhdessä näitä kutsutaan Milankovitchin sykleiksi (Kuva 1, Lowe & Walker 1997).

Maapallon kiertoradan auringon ympäri tiedetään muuttuvan noin 100 000 vuoden jaksoissa lähes ympyrän muotoisesta (matala eksentrisyys) elliptiseksi (korkea eksentrisyys) ja takaisin, joka johtuu muiden aurinkoa kiertävien planeettojen gravitaatiovoimista maata kohti. Tiedetään, että maan akselin kaltevuuskulma vaihtelee noin 41 000 vuoden välein n. 21° ja 24° välillä. Lisäksi noin 23 000 vuoden sykleissä kuun ja auringon vetovoima maata kohti saa maapallon vaappumaan hyrrämäisellä liikkeellä, jota kutsutaan prekessioliikkeeksi (Lowe & Walker 1997; Grotzinger & Jordan 2014).



Kuva 1. Milankovitchin syklit. (Muokattu kuvasta: <https://geologyscience.com/geology-branches/historical-geology/milankovitch-cycles/>)

Milankovitchin syklit saavat aikaan maapallon vuodenaikoihin ja päiväntasauksiin säännöllisen rytmin, joka tarkoittaa, että aika, jolloin maapallo on perihelionissa (lähimpänä aurinkoa) vaihtelee. Pohjoisen pallonpuoliskon talvikausi tapahtuu nykypäivänä perihelionissa ja kesäkausi aphelionissa (kauimpana auringosta). Tilanne kääntyy päinvastaiseksi noin 10 500 vuoden kuluttua, kun taas noin 21 000 vuoden kuluttua jakso on kokonainen. Yhdessä nämä kolme sykliä vaikuttavat maapallon lämpötiloihin merkittävästi pitkällä aikavälillä. Maan kiertoradan vaihtelut auringon ympäri ovat suurin tekijä maahan tunkeutuvan säteilyenergian määrässä, kun taas akselin kaltevuuskulma ja prekessioliike määrittävät, kuinka laajalti auringon säteily maapallolle jakaantuu. (Lowe & Walker 1997; Grotzinger & Jordan 2014)

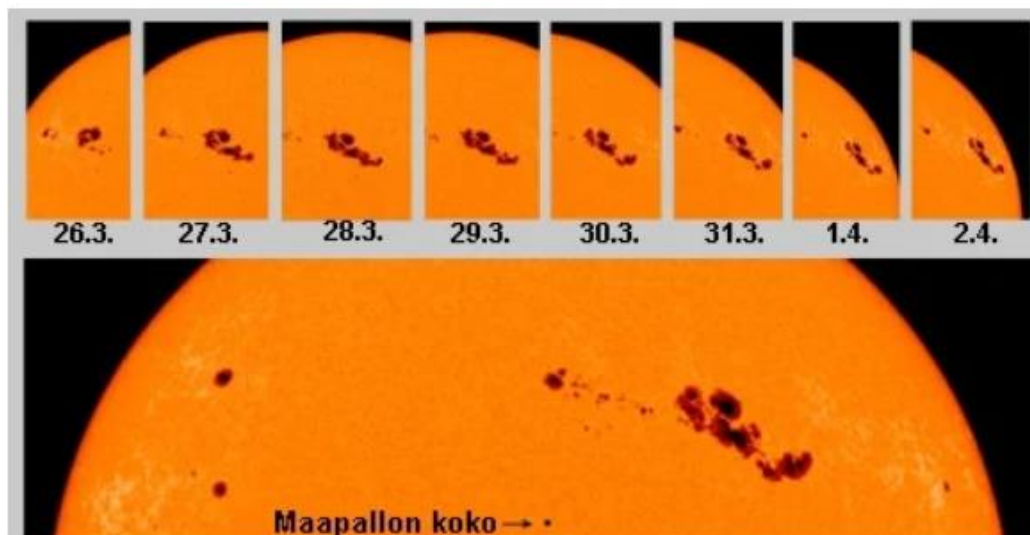
Jäätikkökairauten ja merisedimenttien kairausohjelmien avulla on voitu todeta maapallon eksentrisyyden muutosten korreloivan jäätiköitymisten kanssa vähintään viimeisten 800 000 vuoden aikana. Noin 100 000 vuoden sykleissä tapahtuvat massajäätiköitymiset näyttäisivät täsmävän korkeampaan eksentrisyyteen, jolloin maapallolle ulottuva auringon säteily on vähäisempää. Maan kaltevuuden ja prekessioliikkeen jaksollisuus on voitu osoittaa merisedimenttien huokoseläinten kalkkikuoren isotooppianalyysien lisäksi myös muun muassa tippukiviluolista ja

ajoitetuista kasvillisuuden kehitystä ja ilmastoa kuvaavista sedimenttien siitepölysarjoista. (Lowe & Walker 1997; Grotzinger & Jordan 2014)

2.1.2 Auringon aktiivisuus

Milankovitchin syklien ohella maapallon keskilämpötilan vaihteluun vaikuttava tekijä on myös auringon aktiivisuus. Auringon aktiivisuudella tarkoitetaan muutoksia auringon pinnalla, sekä vaihteluita sen hiukkas- ja sähkömagneettisessa säteilyssä, jotka havaitaan mittalaitteilla maassa tai avaruudessa. Aurinko on aktiivinen silloin, kun muutoksia rekisteröidään normaalia tiheämmin. Auringon aktiivisuustapahtumia ovat muun muassa lyhytkestoiset, kirkkauden muutoksina nähtävät aurinkopurkaukset ns. flaret ja kaasukielekkeet (protuberanssit), jotka nousevat auringon pinnasta. Auringon emittoiman hiukkassäteilyn sekä maahan kohdistuvan, korkeaenergisien sähkömagneettisen säteilyn määrä ja nopeus vaihtelevat auringon aktiivisuuden aikana. (Nevanlinna 2012)

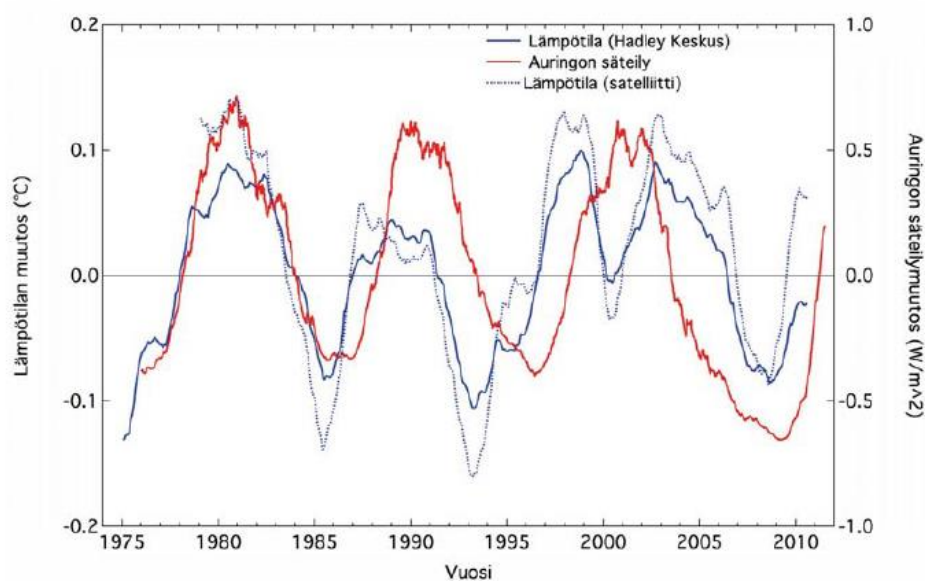
Auringonpilkuiksi kutsutaan auringon pinnalla havaittavia tummia pilkkuja, joiden määrän on todettu vaihtelevan noin 11 vuoden sykleissä, auringonpilkkujaksoissa, auringonpilkkumaksimista pilkkuminimiin. Auringonpilkut syntyvät alueille, joissa voimakas magneettikenttä estää plasman virtauksen pinnan läpi, jolloin pinnalle jäänyt kaasu säteilee energiaansa avaruuteen ja muuttuu tummemmaksi (Kuva 2). Kun magneettikenttä heikkenee tai hajoaa, auringon sisuksista alkaa taas virrata kuumaa plasmaa ja pilkku katoaa. (Solanki 2003)



Kuva 2. Auringonpilkkuryhmän seuranta maaliskuusta huhtikuuhun 2001. [Kuva: Soho. Ilmatieteenlaitos. Haettu sivustolta: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/auringonpilkut>]

Pilkkujaksoilla on huomattu olevan yhteys auringon aktiivisuustapahtumiin, kun hiukkaspurkaukset ja sähkömagneettinen säteily ovat voimakkaampia pilkkujen maksimiaikaan, kuin minimivuosina. Oleellinen tieto maapallon ilmaston kannalta on auringon säteilymuutosten vaikutus maapallon lämpötilavaihteluihin eri ajanjaksoilla. Auringonpilkkujen ja ilmastonmuutosten välistä yhteyttä 1800-luvulla tutkineen W. Köppenin (1846–1940) mukaan havaintosarjat maapallon lämpötilassa osoittavat lämpötilan olleen alhaisin pilkkumaksimien aikaan ja korkein pilkkuminimissä. 1990-luvun alussa havaittiin, että maapallon keskilämpötilan muutokset korreloivat tarkasti auringonpilkkujakson pituuden vaihteluiden kanssa; mitä lyhyempi pilkkujakso, sitä suurempi on auringon lähettämä säteily. Näin ollen koko 1900-luvun ajan lyhentyneet pilkkujaksot merkitsevät maapallon lämpötilan nousua. Auringon hiukkas- ja sähkömagneettinen säteily voivat olla vaikuttajana ilmaston vaihteluihin, kun säteilyenergia muuntelee ilmakehän yläosien fysikaalisia ominaisuuksia, jotka puolestaan voivat välillisesti vaikuttaa myös alailmakehän liikkeisiin ja muutostiloihin. (Nevanlinna 2000, 2012)

Satelliitti- ja pintamittausten mukaan auringon kokonaissäteilymuutos auringonpilkkujaksoissa on heikko sen ollessa vain $\pm 0.1\%$ ja kokonaissäteilyn vaikutus maapallon keskilämpötilaan varsin pieni, alle $\pm 0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (Kuva 3).



Kuva 3. Auringon kokonaissäteilyvoimakkuuden ja maan pintalämpötilan vaihtelu 11 vuoden sykleissä. [Nevanlinna, H. (2012). Ilmatieteenlaitos. *Auringon aktiivisuus ja ilmastonmuutos*.]

Ilmastonmuutospaneeli IPCC:n mukaan viimeisten 250 vuoden aikana maapallon keskilämpötilan kokonaismuutos on noin 0.9 °C, josta auringon osuus maata lämmittävänä tekijänä on vain 10 %, kun ihmistoiminnan voimistamasta kasvihuoneilmiöstä johtuva lämpötilan nousu kattaa suurimman osuuden. Auringon aktiivisuudella ja pilkkujaksoilla on täten pieni vaikutus globaaliin ilmastonmuutokseen. (Nevanlinna 2012)

3 MAAPALLON SYSTEEMIT JA ILMASTO

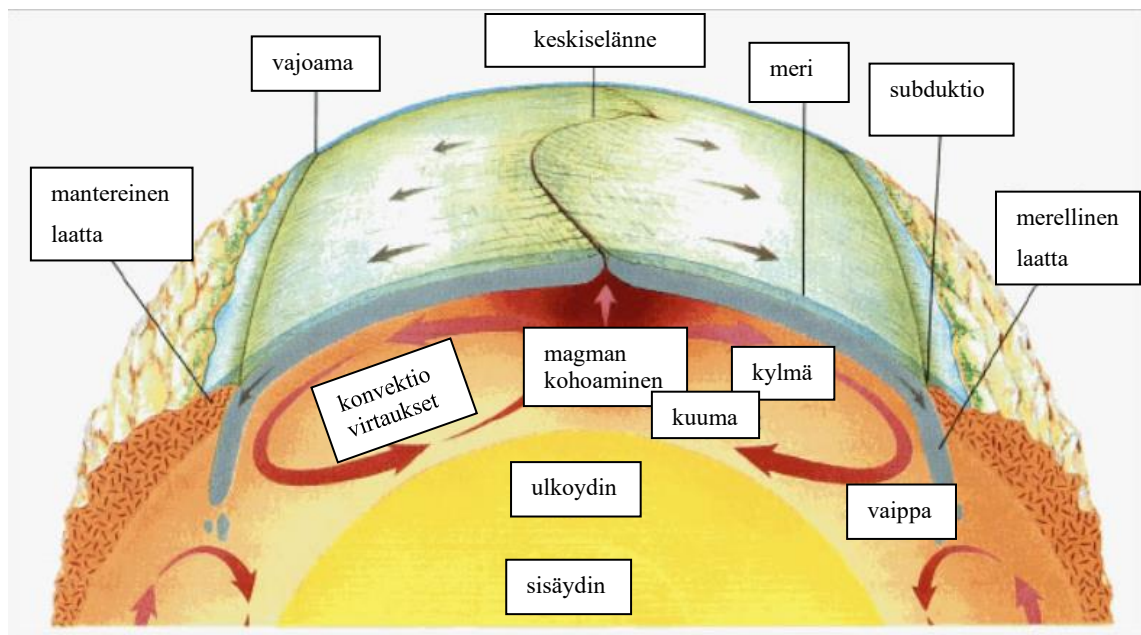
Ulkoisten tekijöiden lisäksi maapallolla vallitsee eri osista ja aineista koostuvia niin kutsuttuja kehiä ja niiden kiertokulkuja, jotka ovat toisiinsa jatkuvassa vuorovaikutuksessa. Nämä maapallon eri osista muodostuneet kehät ovat muokanneet ilmastoa sen nykyiseen olotilaan muokaten sitä edelleen.

3.1 Aineen geologinen kiertokulku

3.1.1 Litosfääri ja laattatektoniikka

Maapallon ytimessä käyvä dynamoprosessi on itseään ylläpitävä mekanismi (Kuva 4). Maan ulkoydin koostuu raudasta ja nikkelistä, joka pysyy nestemäisessä muodossa kovan paineen ja radioaktiivisten aineiden hajoamisreaktion tuottaman lämmön ansiosta. Ulkoytimen tuottama lämpö sekä maapallon vaipassa tapahtuva sama hajoamisreaktio pitää vaipan kivimassan vain osittain sulana, ns. duktiilina. Maan vaippa koostuu raudan ja nikkelin sijaan silikaattimineraaleista, jotka pysyvät lähes kiinteässä muodossa kovasta paineesta huolimatta. (Grotzinger & Jordan 2014)

Maan sisäosista vaippaan nouseva lämpö saa vaipan kivimassan liikkumaan hitaasti ja virtaamaan pyörteisesti, jota kutsutaan konvektiovirtaukseksi. Nämä konvektiovirtaukset puolestaan virtaavat kohti maan kuoriosaa, litosfääriä, joka koostuu tektonisista merellisestä laatasta, tiheydeltään keskimäärin $3,2 \text{ g/cm}^3$, ja mantereisista laatoista, keskimäärin $2,7 \text{ g/cm}^3$. Sulan magman virratessa litosfääriin syntyy uutta merellistä kuorta, joka tarkoittaa samalla, että mannerlaatat erkanevat hitaasti toisistaan ja toisaalla taas törmäävät toisiinsa, työntyen takaisin vaippaan. Uutta merellistä kuorta ja meren pohjaa syntyy valtamerten keskiselänteillä. (Grotzinger & Jordan, 2014; Lunkka 2008)



Kuva 4. Konvektiovirtaukset ja laattatektoniset tapahtumat. [SMS Tsunami Warning. (2023). Muokattu kuvasta: https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/tectonic-plates#.ZC_wAHZBy3A]

Kun mantereinen ja merellinen, tai kaksi merellistä laattaa törmäävät toisiinsa, tapahtuu subduktio. Mantereisen ja merellisen laatan törmätessä merellinen laatta painuu tiheämpänä mantereisen laatan alle takaisin vaippaan, jolloin laattojen törmäysvyöhykkeeseen syntyy syvä vajoama ja mantereisen laatan puolelle muodostuu vulkaanisia vuoria. Esimerkiksi Andien poimuvuoristo Etelä-Amerikan länsipuolella on syntynyt merellisen ja mantereisen laatan törmäyksestä. Törmäyksen yhteydessä tapahtuu myös paljon maanjäristyksiä, kun hitaasti uppoava merellinen laatta hiertää itseään toista laattaa vasten. Kahden merellisen laatan keskinäisessä törmäyksessä toinen laatoista painuu niin ikään toisen alle, ja törmäysvyöhykkeeseen syntyy erittäin syvä vajoama, kuten esimerkiksi Tyynen valtameren Mariaanien hautavajoama, jonka syvyys on yli 10 kilometriä. Merelle muodostuu myös vulkaanisten saarien ketju, kun kylmän litosfäärin painuessa alas vapauttaa se vettä, joka ylös noustessaan aiheuttaa vaipan sulamista. Kahden mantereisen laatan törmäyksessä muodostuu myös vuoria, mutta kummankin laatan ollessa verrattain yhtä tiheitä ne eivät painu toistensa alle, jolloin vulkanismia ei synny. Esimerkiksi Himalajan vuoristo on muodostunut kahden mantereisen laatan, Intian ja Euraasian, toisiinsa törmäyksestä. Litosfäärilaatat voivat liikkua myös toisiinsa nähden sivuttain, jolloin puhutaan siirtovyöhykkeestä, missä syntyy runsaasti maanjäristyksiä. (Grotzinger & Jordan 2014; Brozinski 2018)

3.1.2 Laattatektoniikan vaikutukset globaaliin ilmastoon

Laattatektoniset tapahtumat aiheuttavat vuorenmuodostusta, jolloin merenpinnan yläpuolelle syntyy rapautumiselle altista maanpintaa. Valtamerien keskiselänteellä muodostuu uutta merenpohjaa, jolloin avautuu uusia salmia ja merien kuljettamassa lämpövuossa tapahtuu muutoksia, jolloin myös lämmön jakaantuminen maapallolle muuttuu. Merkittäviä ilmastoon vaikuttavia laattatektonisia tapahtumia ovat etenkin kahden mantereisen laatan törmäykset. Esimerkiksi noin 40 miljoonaa vuotta sitten alkanut ja edelleen jatkuva Intian ja Euraasian mannerlaattojen törmäys ja Himalajan vuoriston synty ovat vaikuttaneet osaltaan ratkaisevasti ilmaston kylmenemiseen noin 40 miljoonan viime vuoden aikana. Vuorenmuodostuksessa syntyvä maanpinta kasvattaa rapautumisintensiteettiä, jonka seurauksena hiilidioksidi on vähentynyt ilmakehästä. Rapautumisprosessi kuluttaa ilmakehän hiilidioksidia, kun silikaattimineraalit reagoivat hiilidioksidin ja veden kanssa muodostaen rapautumistuotteita, kuten alkali-maa-alkalimetalli-ioneja sekä bikarbonaatti-ioneja. Rapautumistuotteet kulkeutuvat mantereilta jokien mukana meriin, missä merieliöstö hyödyntää niitä pii- ja kalkkikuoriensa muodostukseen. (Lunkka 2008)

Mannerlaattojen törmäyksessä vuorten kohotessa tarpeeksi korkeaksi se vaikuttaa myös ilmakehän ilmavirtojen rakenteeseen ja ilmakehän suihkuvirtauksiin. Korkeammilla alueilla esiintyy myös enemmän jäätä ja lunta kylmän ilman vuoksi ja täten lumen albedovaikutus (ks. kappale 3.2) kasvaa, jolla on ilmastonmuutoksen kannalta negatiivinen ilmastopalaute, eli ilmasto viilentävä vaikutus. (Lunkka 2008; Lowe & Walker 1997)

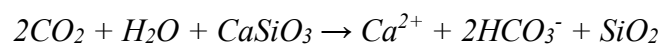
Mannerlaattojen vaeltaminen saa aikaan muutoksia valtamerien merivirroissa ja siten maapallon lämmön jakaantumisessa, joka vaikuttaa alueelliseen ja globaaliin ilmaston muuttumiseen. Välimeren alueen ja pohjoisen pallonpuoliskon ilmastokehitykseen on vaikuttanut suuresti Tethysmeren sulkeutuminen Välimeren kohdalla noin 60 miljoonaa vuotta sitten. Tethysmeri muodosti yhden lämpöenergiaa sitovan ja luovuttavan varaston päiväntasaajan pohjoispuolella, jolla oli ilmasto leudontava vaikutus. Arabian ja Euraasian laatan törmäyksessä Tethysmeri, sekä meriyhteys Intian valtameren ja nykyisen Välimeren välillä sulkeutui, joka vaikutti suuresti merivirtojen kiertoon ja siten pohjoisen pallonpuoliskon ilmaston viilenemiseen. Noin 34 miljoonaa vuotta sitten

Etelämantereelle alkoi muodostua laajoja jäätiköitä, joiden synnyn uskotaan liittyvän laattatektoniikkaan. Noin 45 milj. vuotta sitten Etelämanner erkaantui Etelä-Amerikasta, jolloin näitä kahta mannerta erottava Drakensalmi muodostui niin syväksi, että valtamerien pohjavesimassat sekoittuivat keskenään. Vielä liitukaudella Etelämanner ja Australia olivat yhtenäinen manner, kunnes n. 35 milj. vuotta sitten Australian hiljalleen irtaantuessa Etelämantereesta niiden väliin syntyi syvä salmiyhteys Tasmanianportti. Näiden laattatektonisten tapahtumien seurauksena Etelämanner eristäytyi termisesti ja aiemmin lämpiminä kiertävät merivirrat eivät tuoneet enää lämpöä Etelämantereelle, vaan sen ympärille muodostui kylmä, mannerta kiertävä merivirta, joka lopulta johti jäätiköiden muodostumiseen mantereelle. (Lunkka 2008)

Noin 2,6 miljoonaa vuotta sitten alkanutta kvartaarikautta kutsutaan myös jääkausien ajanjaksoksi, jolloin ilmasto kylmeni ja pohjoiselle pallonpuoliskolle alkoi muodostua kilometrien paksuisia mannerjäätiköitä. Kvartaarikauden alkamisen eräänä ratkaisevana tekijänä pidetään laattatektoniikkaan liittyvää Panaman kannaksen (Isthmus of Panama) syntyä yhdistämään Etelä- ja Pohjois-Amerikkaa noin 3–3.5 miljoonaa vuotta sitten, joka vaikutti suuresti merien lämpötilaan (Lowe & Walker 1997; Grotzinger & Jordan 2014).

3.1.3 Rapautumisprosessit

Litosfäärilaattojen vaeltaminen ja törmäminen toisiinsa on synnyttänyt tuhansia metrejä korkeita vuoristoja, joita fyysinen ja kemiallinen rapautuminen kuluttaa. Kemiallisessa rapautumisessa kivien mineraalit muuttuvat tai liukenevat happaman sadeveden vaikutuksesta seuraavasti:



Fysikaalisessa rapautumisessa kiviaines lohkeilee ja murtuu esimerkiksi kallioperän raoissa olevan veden toistuvan jäätymisten ja sulamisen, tai pelkästään lämpörapautumisen seurauksena. Myös kemiallinen rapautuminen heikentää kallioperää ja kiviainesta, joten molemmat samanaikaiset sekä kemialliset, että fysikaaliset rapautumisprosessit tehostavat kiviaineksen rapautumista (Grotzinger & Jordan 2014).

Kemiallinen rapautuminen muokkaa maapallon pinnanmuotoja, säätelee kemiallisia kiertokulkuja, sekä ravinteiden saantia ekosysteemeissä. Rapautumista tapahtuu

maailmanlaajuisesti vaihtelevalla intensiteetillä; mitä enemmän syntyy uutta mannerta, sitä enemmän on pinta-alaa rapautumiselle. Myös alueella vallitsevat ilmasto-olosuhteet, kuten esim. vuotuisen sadannan määrä, sekä kivilajikoostumus vaikuttavat rapautumisen intensiteettiin. Silikaattirapautuminen on yksi kemiallisen rapautumisen muoto, jonka uskotaan vaikuttavan ilmastoon pitkällä aikavälillä (West, ym. 2005).

Silikaattirapautumisessa rapautumisprosessi kuluttaa ilmakehän hiilidioksidia, joka lopulta varastoituu karbonaateina valtameriin. Prosessissa silikaattimineraalit reagoivat hiilidioksidin (CO_2) ja veden (H_2O) kanssa, jolloin reaktion tuotteena syntyy karbonaattikationeja (Ca^{2+}) sekä bikarbonaatti-ioneja (HCO_3^-). Nämä kationit ja ionit kulkeutuvat jokien mukana valtameriin, missä merieliöstö hyödyntää niitä pii- ja kalkkikuoriensa muodostukseen. Lopulta eliöt hautautuvat merenpohjaan varastoituen karbonaateina merisedimentteihin. (Walker, ym. 1981)

3.2 Kryosfääri ja jäätiköiden vaikutus ilmastoon

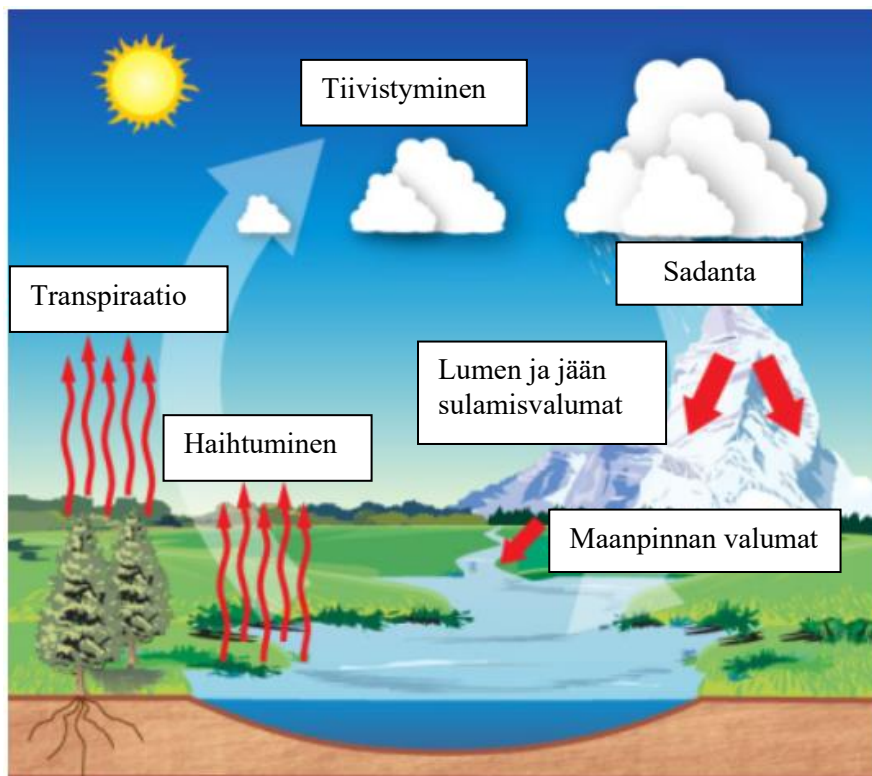
Maapallolla on tällä hetkellä kaksi mannerjäätikköä, Antarktiksensa ja Grönlannin mannerjäätiköt, sekä vuotuiset merijäät niin etelä-, kuin pohjoisnavalla. Mannerjäätiköiden ja merijään sekä mantereisten lumipeitteisten alueiden levinneisyys maapallolla luo yhden suurimmista negatiivisista ilmastopalautteista niiden albedovaikutuksen vuoksi, jolla tarkoitetaan pinnan kykyä heijastaa auringon säteilyä. Mannerjäätiköt ja merijää sekä lumipeite voivat heijastaa 40–90 prosenttia auringosta tulevasta säteilystä takaisin avaruuteen, joka vähentää maanpinnan saamaa säteilymäärää ja siten hidastaa ilmaston lämpenemistä. Jäätiköityminen ja jäätiköiden leviäminen on itseään kiihdyttävä prosessi. Lunta sataa mantereille talvikausina enemmän kuin sitä kerkeää sulaa kesän aikana ja siten jäätiköiden pinta-ala kasvaa laskien samalla merenpinnan tasoa. Jäätiköiden levitessä matalammille leveysasteille ne heijastavat auringon säteilyä takaisin avaruuteen ja maapallon lämpötila laskee edelleen. Glasiaalijakso päättyy ja interglasiaalijakso alkaa lämpötilan noustessa, jolloin jäätiköt sulavat ja merenpinta nousee. Lämpötilan nousun on arvioitu johtuvan hiilidioksidipitoisuuden noususta ilmakehässä. Teorioiden mukaan hiilidioksidia on päässyt ilmakehään muun muassa tulivuoritoiminnan vuoksi. Merijään sulaessa ja pinta-

alan pienentyessä merivesi vapauttaa lisää lämpöä ilmakehään. (Lunkka 2008; Grotzinger & Jordan 2014)

Nykyään jäätiköt peittävät noin kolme prosenttia koko maapallon pinta-alasta. Lisääntyneiden kasvihuonekaasujen ja sen myötä lämmenneen ilmaston vuoksi etenkin arktinen merijää pienentyy, samalla heikentäen sen albedoa ja näin ollen auringosta tuleva lämpösäteily sitoutuu meriin. Ilmaston lämmetessä myös lumisateet heikkenevät, jolloin uutta jäätä ei pääse muodostumaan. (Lunkka 2008)

3.3 Hydrosfääri ja veden kierto

Kaikki maan päällä oleva vesi kiertää valtamerissä, ilmakehässä, sekä maan pinnalla ja pinnan alla olevien vesivarantojen välillä (Kuva 5).



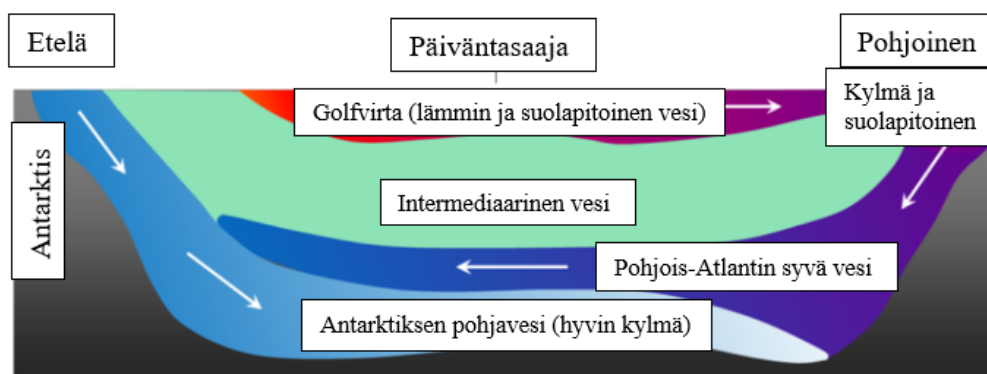
Kuva 5. Veden kierto. [NOAA. *The Hydrologic Cycle*. (2023). Muokattu kuvasta: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/hydro>]

Veden liikkumista valtameristä ilmakehään haihuttamalla, maan pinnalle sateen kautta, virtauksiin maan päällä ja alla, ja lopulta valumien kautta takaisin valtameriin, kutsutaan

hydrologiseksi kierroksi. Maapallon eri lämpötila-alueilla vesi esiintyy kolmena eri olomuotona: nestemäisenä (vesi) hydrosfäärissä, kaasuna (vesihöyry) atmosfäärissä ja kiinteänä (jää) kryosfäärissä. Auringon lämpösäteily ohjaa hydrologista kiertoa pääosin haihduttamalla vettä valtameristä ja kuljettamalla sitä vesihöyrynä ilmakehässä. Oikeissa lämpötila- ja kosteusolosuhteissa vesihöyry tiivistyy pieniksi vesipisariksi, jotka muodostavat pilviä ja putoavat lopulta vesi- tai lumisateena. Osa maalle satavasta vedestä suotautuu maaperään ja kallioon pienten halkeamien ja muun huokoisen aineen kautta, josta syntyy pohjavettä. Osa tästä pohjavedestä haihtuu suoraan maaperän läpi ja palaa ilmakehään vesihöyrynä, ja toinen osa liikkuu biosfäärin läpi, kun kasvit imevät vettä maaperästä ja palauttavat sitä ilmakehään transpiraation kautta. (Grotzinger & Jordan 2014)

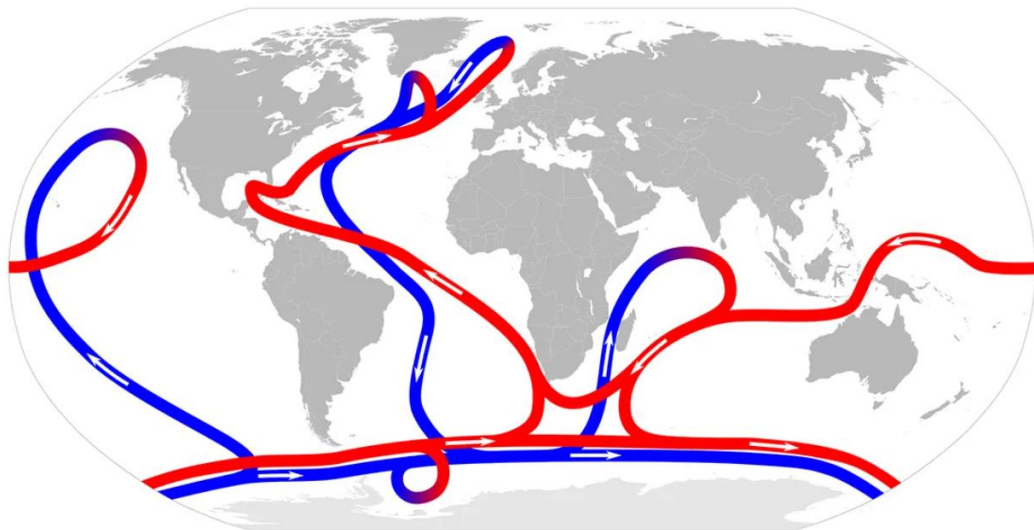
3.3.1 Pintamerivesien ja termohaliinisen kierron vaikutukset ilmastoon

Meret peittävät suurimman osan (n. 70 %) maapallon pinta-alasta, jolloin merten ilmastovaikutus on hyvin olennainen. Useat erityyppiset merivirtaukset kierrättävät merivettä maapallolla kuljettaen lämpöenergiaa päiväntasaajalta ylemmille leveyspiireille, jolloin ne vaikuttavat niin paikalliseen, kuin globaaliin ilmastoon (Kuva 6). Planetaariset tuulet sekä maapallon pyörimisestä aiheutuva coriolisvoima ohjaavat noin 100 metrin paksuisen pintameriveden liikettä, ja ne synnyttävät suuria spiraalimaisia merivirtauksia, kun coriolisvoima kääntää virtauksia eri suuntaan, kuin vallitseva tuulensuunta. Esimerkiksi yksi Pohjois-Euroopan leutoon ilmastoon vaikuttava tekijä on Golfvirta. Pintameriveden alapuolella olevaa vesimassaa ohjailee veden lämpötila ja suolapitoisuus. (Lunkka 2008)



Kuva 6. Atlantin syvän meriveden kierto. [Earle, S. (2019). *Physical geology*. Muokattu kuvasta: <https://opentextbc.ca/physicalgeology2ed/chapter/18-4-ocean-water/>]

Päiväntasaajalta pohjoista kohti kulkeva suolainen pintamerivesi kylmenee matkalla ja muuttuu suolapitoisuutensa vuoksi niin raskaaksi, että se vajoaa muutaman kilometrin syvyyteen Pohjois-Atlantin pohjalla kulkevaksi merivirraksi (Kuva 7). Pohjalla kulkeva merivesi jatkaa matkaansa kohti eteläistä pallonpuoliskoa, missä se saavuttaa Antarktista kiertävän hyvin kylmän pohjamerivirran ja asettuu sen yläpuolelle. Hitaasti edeten Pohjois-Atlantin pohjavirta nousee lopulta pintaan Intian valtamerellä Afrikan ja Intian välissä, sekä Tyynellä valtamerellä päiväntasaajan pohjoispuolella. Tätä meren pinnalta pohjaan painuvan ja pinnalle takaisin nousevan veden kiertoa kutsutaan termohaliiniseksi kierroksi. Globaalissa mittakaavassa merten pinnassa ja pohjalla olevat vesimassat ovat yhteydessä toisiinsa termohaliinisen kierron kautta ja muutokset termohaliinisessa kierrossa voivat siten vaikuttaa suuresti ilmastoon. (Lunkka 2008; Encounter Edu; Earle 2019)

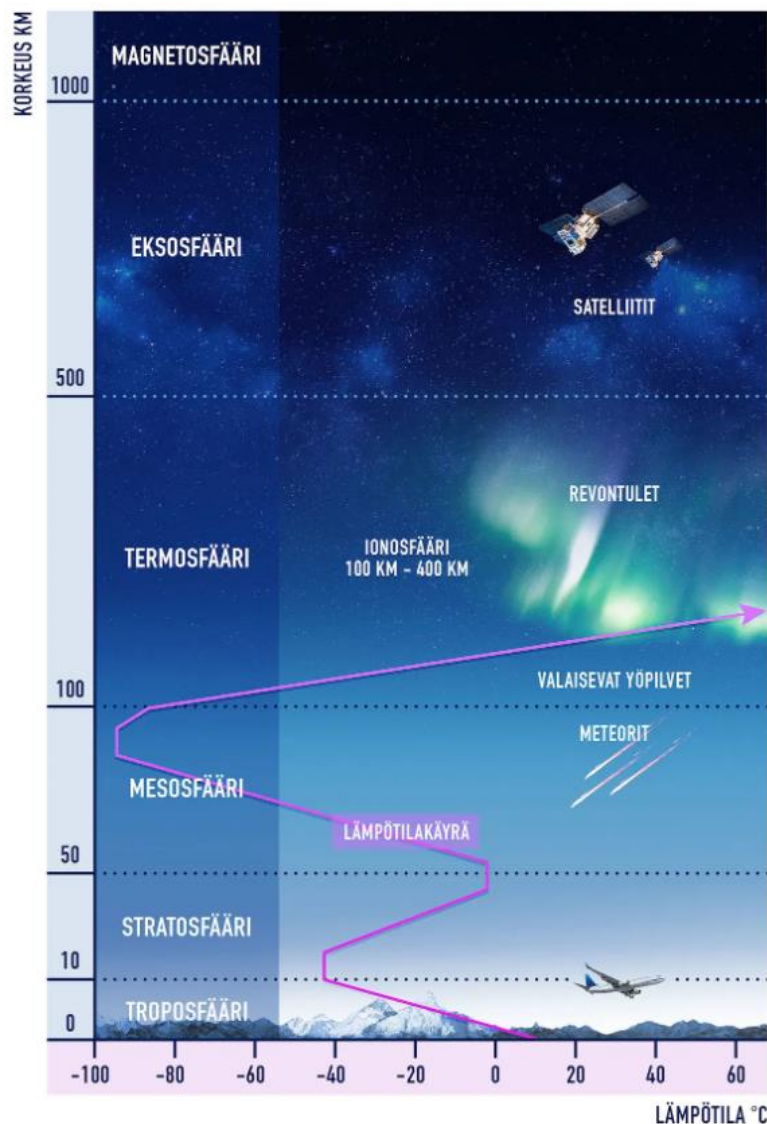


Kuva 7. Termohaliininen kierto. Punainen väri osoittaa lämmintä virtausta ja sininen kylmää. [Encounter Edu (ei pvm.). Haettu sivustolta: <https://encounteredu.com/multimedia/images/why-is-thermohaline-circulation-so-important>]

3.4 Atmosfääri

Maapalloa ympäröivä kaasuista koostuva atmosfääri, ts. ilmakehä muodostaa eri korkeuksilla olevien kerrosten kokonaisuuden, joiden fysikaalista ja kemiallista tilaa säätelee auringon säteily. Ilmakehä on kaasukoostumukseltaan (lukuun ottamatta vesihöyryä) n. 78 % typpeä (N_2), n. 21 % happea (O_2) ja 0.93 % argonia (Ar). Jäljelle jäävä 0.04 % koostuu muun muassa niin kutsutuista kasvihuonekaasuista, kuten hiilidioksidista (CO_2), metaanista (CH_4), dityppioksidista (N_2O) sekä otsonista (O_3). Kasvihuonekaasuihin luetaan myös vesihöyry, jota esiintyy ilmakehässä vaihtelevina osuuksina typen, hapen ja argonin kanssa, kokonaisuudessaan noin 4 %. Kasvihuoneilmiö on maapallolla luonnollisesti esiintyvä ilmiö, joka luo elämälle suotuisat olosuhteet. Ilmakehässä olevilla kasvihuonekaasuilla on kyky absorboida auringosta säteilevää energiaa ja toimia maapallon lämmittäjinä. Etenkin hiilidioksidin on todettu olevan yksi parhaiten säteilyä absorboiva kaasu, jota ilman maapallon lämpötila olisi noin $33^\circ C$ kylmempi, nykyisen noin $15^\circ C$ keskilämpötilan sijaan. (IPCC 2007; NOAA 2023)

Ilmakehän alin kerros, jossa sääilmiöt tapahtuvat on troposfääri, joka kattaa ilma-alan maanpinnalta noin 10 kilometrin korkeuteen (Kuva 8). Noin 99 % ilmakehän vesihöyrystä esiintyy troposfäärissä ja näin ollen pilvet muodostuvat tässä kerroksessa. Troposfäärin jälkeen alkava stratosfääri jatkuu noin 50 kilometrin korkeuteen. Auringon ultraviolettisäteilyä absorboiva otsonikerros sijaitsee stratosfäärissä 15–40 kilometrin korkeudella. Stratosfääriä ylöspäin mentäessä lämpötila nousee sen ylärajalla nollan tuntumaan, toisin kuin troposfäärin ylärajalla se on noin $-40^\circ C$. Stratosfäärin jälkeen alkaa mesosfääri, joka ulottuu noin 85 kilometrin korkeuteen. Lähellä mesosfäärin ylärajaa lämpötila on noin $-90^\circ C$, joka on ilmakehän kylmin kerros. Lämpötila on mesosfäärissä hyvin kylmä, koska kerroksessa ei muodostu auringon lämpösäteilyä absorboivia ilmamolekyylejä. Suurin osa maata kohti syöksyvistä meteoriiteista palaa mesosfäärissä. (UCAR 2024)



Kuva 8. Ilmakehän rakenne. [Ilmatieteenlaitos. (2021). Ilmakehän kerrokset. Haettu sivustolta: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/ilmakeha-ja-saailmiot>]

Mesosfäärin jälkeen tulevia kerroksia pidetään enemmän avaruudellisina kerroksina. Rajaa, missä ilmakehä loppuu ja ulkoavaruus alkaa kutsutaan Kármán rajaksi (Kármán Line), joka sijaitsee termosfäärissä noin 100 kilometrin korkeudella. Termosfääri absorboi tehokkaasti auringon korkeaenergistä säteilyä ja lämpötila nousee jälleen satoihin, ja jopa 2000 asteeseen. Revontulia esiintyy ionosfäärissä, joka on myös osa termosfääriä. Auringon säteilyn säädellessä termosfäärin lämpötilaa ja korkeutta, voi termosfäärin yläraja olla missä vain 500 ja 1000 kilometrin välillä. Vaikka ilmakehän ja avaruuden rajana pidetäänkin termosfäärin alaosa, sen jälkeinen kerros eksosfääri on luettu viimeiseksi kaasupitoiseksi kerrokseksi, vaikka siellä ”ilma” onkin erittäin ohutta, lähes olematonta. Eksosfäärin ylärajaa ei pystytä enää määrittämään. (UCAR 2024)

3.4.1 Ilmakehän merkitys ilmastonmuutoksessa

Ilmakehällä on merivirtojen tavoin merkittävä osuus maapallon ilmaston säätelyssä. Lämmön siirtyminen trooppisilta alueilta korkeammille leveysasteille tapahtuu merivirtojen lisäksi myös ilmakehän välityksellä, niin sanotun Hadleyn kierron avulla. Hadleyn kierto on ilmavirtauksen kiertoliike, joka saa alkunsa päiväntasaajalta. Päiväntasaajan lämmin ilma sisältää paljon vesihöyryä, eli latenttia energiaa. Ilman kohotessa ylöspäin se viilenee, ja vesihöyry tiivistyy vedeksi samalla luovuttaen energiaa Hadleyn ilmavirtaukseen. Lopulta tiivistynyt vesi sataa takaisin päiväntasaaja-alueelle. Nyt kuiva, mutta lämmin ilmavirta siirtyy kummankin pallonpuoliskon noin 30. leveyspiirin alueille, jossa se laskeutuu alaspäin leveyspiireillä vallitsevan korkeapaineen vuoksi. Alaspäin vajotessaan ilmavirtaus lämpenee ja muuttuu yhä kuivemmaksi. Pasaati- ja länsituulet saavat alkunsa 30. leveyspiirien korkeapainealueilta, kun ilmaa virtaa täyttämään päiväntasaajan sekä napojen matalapainealueita. Pasaatituulet kuljettavat osan alas vajonneesta lämpimästä ilmamassasta 30. leveyspiireiltä takaisin päiväntasaajalle, kun taas länsituulet kuljettavat osan kohti pallonpuoliskojen korkeampia leveysasteita. Pohjois- ja Etelänapojen alueilta alemmille leveysasteille kulkevat kylmät ilmavirtaukset kohtaavat subtrooppiset lämpimät virtaukset, jolloin lämpöä siirtyy korkeille leveysasteille. (Lunkka 2008; Bradley 1999)

El Niño ja La Niña ovat normaalista säätilanteesta poikkeavia ilmiöitä, jotka kuuluvat luonnollisena osana maapallon ilmastoon. Ilmiöt liittyvät vesi- ja ilmakehän hitaasti tapahtuviin muutoksiin. Normaaliolosuhteissa Tyynellä valtamerellä idästä länteen puhaltavat pasaatituulet kuljettavat lämmintä pintavettä Etelä-Amerikasta kohti Aasiaa. Syvemmältä merestä nousee kylmää vettä korvaamaan tuulien kuljettaman lämpimän pintaveden (eng. ”upwelling”). El Niño -ilmiössä pasaatituulet heikkenevät, jolloin lämmin pintamerivesi kulkeutuu läntiseltä Tyyneltä mereltä takaisin kohti itää, työntäen kylmän meriveden meren syviin osiin (eng. ”downwelling”). Heikon tuulen vuoksi itäisellä Tyynellä merellä pysyttelevä lämmin pintamerivesi saa aikaan muutoksia Tyynenmeren suihkuvirtauksessa, joka aiheuttaa etenkin Pohjois-Amerikan eteläosiin sateita ja tulvia, sekä pohjoisosiin lämmintä ilmaa. (NOAA 2024)

La Niña -ilmiössä pasaatituulet puhaltavat normaalia voimakkaammin, jolloin myös lämmintä pintavettä kulkeutuu normaalia suurempia massoja kohti Aasiaa. Täten meren

pohjaosista nouseva kylmä vesi korvaa suuremman pinta-alan. Voimakkaan tuulen vuoksi nyt Tyynenmeren itäpuolella pysyttelevä kylmä merivesi vaikuttaa suihkuvirtaukseen niin, että se aiheuttaa Pohjois-Amerikan eteläosiin kuivuutta ja pohjoisosiin kylmempää ilmaa, sateita sekä tulvia. Tyypillisesti El Niño ja La Niña ilmiöt kestävät 9–12 kuukauden ajan, mutta joskus ne voivat kestää jopa vuosia. Ilmiöiden on havaittu esiintyvän 2–7 vuoden välein, mutta tarkkaa ajankohtaa ilmiöille ei voida ennustaa. (NOAA 2024)

3.5 Biosfääri ja hiilen kiertokulku

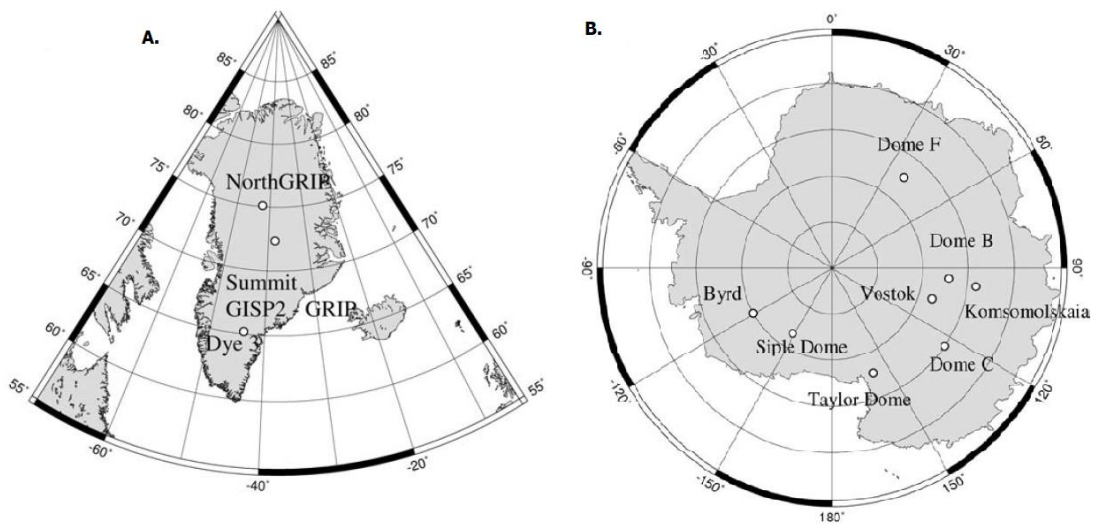
Biosfääri kattaa kaikki elävät organismit maapallon pinnalla, maanpinnan alapuolella, vedessä ja ilmakehässä. Biosfäärin vaikutuksen ulottuessa litosfääriin, hydrosfääriin sekä ilmakehään, se pystyy muokkaamaan ja jopa kontrolloimaan joitain geologisia prosesseja, vaikuttaen näin myös ilmastoon. (Grotzinger & Jordan 2014)

Eliöiden toiminta voi vaikuttaa ilmakehän kaasupitoisuuksiin ja tiettyjen alkuaineiden kiertoon maankuoressa. Maan kasvillisuus vaikuttaa ilmakehän lämpötilaan sekä kosteuteen; kasvit absorboivat auringon säteilyä fotosynteesiä varten, jolloin soluhengityksen aikana vapautuu lämpöenergiaa. Kasvit ottavat myös pohjavettä ja vapauttavat sen takaisin ilmakehään vesihöyryinä. Eliöt säätelevät myös ilmakehän koostumusta ottamalla vastaan tai vapauttamalla kasvihuonekaasuja, kuten hiilidioksidia (CO₂) ja metaania (CH₄). Kaiken elollisen perusrakennusaine maapallolla on hiili, joka kiertää jatkuvasti eri hiilivarastojen välillä. Ilmakehässä hiili esiintyy hiilidioksidina, mantereisilla alueilla sekä merien pintaosissa se on sitoutuneena kasvien biomassaan, ja syvemmällä merissä hiili on lähes kokonaan liuenneina bikarbonaatti-ioneina. Fotosynteesissä kasvit ja levät käyttävät ilmakehän hiilidioksidia, jolloin hiilidioksidin hiili sitoutuu kasveihin. Kasveihin sitoutunut hiili siirtyy taas biosfääristä litosfääriin, kun biomassa hautautuu orgaanisena aineena kerrostuen merenpohjan sedimentteihin. Näin ollen biosfääri toimii keskeisessä roolissa hiilenkierrossa. Lopulta nämä orgaaniset jäännökset muuttuvat öljy-, maakaasu- ja hiiliesiintymiksi, joita ihminen nykypäivänä polttaa siirtäen hiiltä litosfääristä ilmakehään hiilidioksidipäästöjen muodossa. (Lunkka 2008; Grotzinger & Jordan 2014)

3.5.1 Jääkairanäytteet hiilidioksidipitoisuuksien määrittämisessä

Miljoonien vuosien aikana kerrostuneeseen jäähän hautautunut informaatio voi antaa tärkeitä tietoja menneistä ilmasto-olosuhteista esimerkiksi ilmakehän kasvihuonekaasujen pitoisuuksia tutkimalla. Jäätikkökairaukset ovat osoittautuneet merkittäviksi ilmastotutkimusten kannalta, sillä jääkairanäytteet voivat tarjota paljon todisteita muuttuneesta ilmastosta eri aikakausina ennen ihmistoiminnan vaikutusta, sekä ymmärrystä luonnollisesta ilmaston vaihtelusta. Jään sisälle loukkuun jääneiden ilmakuplien CO₂- ja CH₄-pitoisuuksia analysoimalla voidaan määrittää, kuinka näiden kasvihuonekaasujen pitoisuudet ilmakehässä ovat vaihdelleet ajan saatossa. (Hubertus, ym. 1999)

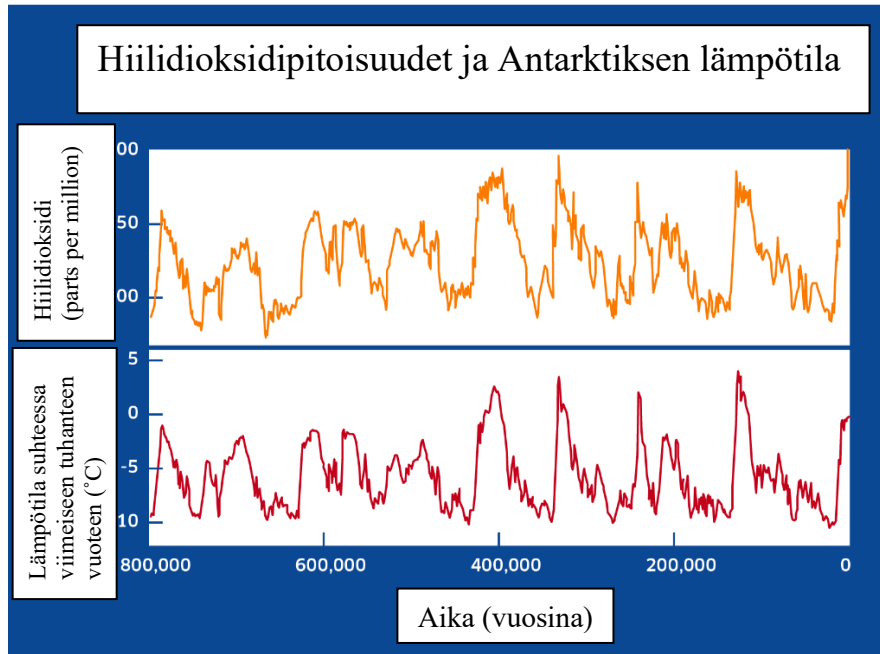
Jäätikkökairauksia suoritetaan useilla asemilla mannerjäätiköillä Grönlannissa ja Antarktiksella (Kuva 9). Jäätikkökairausohjelmista merkittävimmät ovat tällä hetkellä Antarktiksella European Project for Ice Coring in Antarctica (EPICA) ja Grönlannissa toimiva North Greenland Ice Project (NGRIP).



Kuva 9. Kairausasemia Grönlannissa (A.) ja Antarktiksella (B.). [Masson-Delmotte ym. (2006). Climate Dynamics. Haettu sivustolta: https://www.researchgate.net/publication/43155294_Past_and_future_polar_amplification_of_climate_change_Climate_model_intercomparisons_and_ice-core_constraints]

Antarktiksella kairattujen näytteiden CO₂ ja CH₄ pitoisuuksia tutkimalla on pystytty osoittamaan, että Antarktiksella pitkän aikavälin lämpötilanvaihtelut korreloivat pohjoisella pallonpuoliskolla vaikuttaneiden glasiaali- ja interglasiaalijaksojen, eli

ilmaston kylmenemisten ja lämpenemisten kanssa viimeisten 800 000 vuoden aikana (Kuva 10).



Kuva 10. Hiilidioksidipitoisuudet glasiaali- ja interglasiaalijaksoissa. [*Climate Change: past and future*. (ei pvm.). Muokattu kuvasta: <https://discoveringantarctica.org.uk/oceans-atmosphere-landscape/atmosphere-weather-and-climate/climate-change-past-and-future/>]

Jääkairanäytteiden CO₂ ja CH₄ analyysit myös osoittavat, että kasvihuonekaasujen nykyiset pitoisuudet ilmakehässä ovat korkeammat kuin koskaan aiemmin mitatuista pitoisuuksista. Ihmistoiminnan ja etenkin teollisen ajan alkamisen jälkeen ilmakehään vapautuva ylimääräinen hiilidioksidi lämmittää maapalloa entisestään ja täten nostaa maapallon keskilämpötilaa. (NASA; Discovering Antarctica)

Arktisella ja Antarktiksella alueilla keskilämpötila on noussut noin 2°C 1960-luvulta lähtien. Grönlannin jääkairanäytteistä saadun informaation avulla on voitu havaita Arktisten alueiden lämpötilan nousun olevan jopa 4,5 kertainen globaaliin keskilämpötilan nousuun nähden. Jääkairanäytteiden lisäksi Grönlannissa tutkitaan mannerjäätikön alla olevaa kallioperää. Jäämassan alle hautautuneet kallioperässä olevat mineraalit voivat antaa informaatiota mannerjäätikön kehityksestä ja historiasta, jolloin manner saattoi olla täysin jäätön, tai jäätä oli hyvin vähän. Tutkimus on ratkaisevan tärkeää jäätiköiden sulamisen ja merivedenpinnan noususta seuraavan uhan arvioimiseksi. (Masson-Delmotte ym. 2006; Voosen 2020)

4 YHTEENVETO

Maapallon ilmasto ja sen muutokset muodostuvat maapallolla luonnollisesti esiintyvien ilmiöiden seurauksena. Ilmastosysteemi ja siihen vaikuttavat prosessit ovat hyvin moniulotteisia, ja suorassa sekä epäsuorassa vaikutuksessa toisiinsa monella eri tavalla. Maapallon sisäiset, niin sanotut kehät ja niiden kiertokulut säätelevät yhdessä maapallon ilmastoa. Myös auringon aktiivisuus, maapallon asema aurinkoon nähden sekä muut ulkoiset, astronomiset tekijät vaikuttavat maapallon pitkäaikaisiin ilmaston vaihteluihin. Ulkoiset pakotteet vaikuttavat myös maapallon sisäisiin prosesseihin.

Laattatektonisilla tapahtumilla on merkittävä vaikutus maapallon ilmaston pitkäaikaisille muutoksille. Ne synnyttävät uutta rapautumiselle altista maanpintaa, jolla on ilmastoa viilentävä vaikutus, kun rapautumisprosessissa silikaattimineraalit kuluttavat ilmakehän hiilidioksidia. Litosfäärilaattojen vaeltaminen muokkaa mantereiden asemaa maapallolla aurinkoon nähden, kuinka epäsuorasti tai suorasti auringon säteily mantereille ulottuu. Laattojen liikkeet ja toisiinsa törmäykset muokkaavat myös merivedenkierron suuntia, sekä vuorenmuodostuksessa tarpeeksi korkealle kohoavat vuoret voivat vaikuttaa ilmakehän liikkeisiin.

Merivirrat ja ilmakehä ovat merkittävin tekijä lämmön jakautumisessa maapallolle. Päiväntasaaja-alueen lämmin ilmassa ja merivesi kulkeutuu ilmakehän ja merivirtojen avulla molemmille pallonpuoliskoille. Noin 100 metrin paksuista pintavettä ohjailee planetaariset tuulet, kun taas sen alapuolella olevaa vesimassaa säätelee veden suolapitoisuus. Meriveden suolapitoisuus ja lämpötila saa aikaan termohaliinisen kierron, jolloin kylmentyessään suolainen merivesi painuu meren pohjalle ja päinvastoin. Merten pinnassa ja pohjalla olevat vesimassat ovat yhteydessä toisiinsa termohaliinisen kierron avulla, ja muutokset termohaliinisessa kierrossa voivat vaikuttaa globaalisti ilmastoon.

Yhden suurimmasta negatiivisesta ilmastopalautteesta luo maapallon jään ja lumen peittämät alueet niiden albedovaikutuksen vuoksi. Kuitenkin ihmistoiminnan seurauksena hiilidioksidipitoisuuden lisääntyminen ilmakehässä on johtanut maapallon keskilämpötilan nousuun ja siten jäätikköalueiden pienenemiseen. Ilmaston lämmitessä lumisateet heikkenevät, eikä uutta jäätä pääse muodostumaan. Jäätiköiden pienenemyssä

auringon lämpösäteily sitoutuu meriin, joka lämmittää maapalloa entisestään. Jäätiköiden sulaessa myös merivedenpinta nousee ja vedenpinnan nousun seurauksia ei vielä täysin tunneta. Jäätiköillä suoritettavat tutkimukset ovat erityisen tärkeitä näiden tapahtumien vaikutusten arvioimiseksi.

Maapallolla luonnollisesti esiintyvät ja maan ulkopuolella vallitsevat prosessit luovat ilmastojärjestelmän, joka on jatkuvassa muutoksessa. Geologisista tutkimuksista on todettu ilmaston muuttuneen useita kertoja maapallon historian aikana. 1750-luvun teollisen vallankumouksen jälkeen ilmakehän kasvihuonekaasujen, mm. hiilidioksidin ja metaanin pitoisuudet ovat nousseet hyvin nopeasti ja ovat nykypäivänä ennätysellisen korkeat. Ilmastonmuutostutkimukset ovat osoittaneet pitoisuuksien nousun aiheutuvan pääosin ihmisen käyttämien fossiilisten polttoaineiden päästöistä. On ensiarvoisen tärkeää ymmärtää menneitä ilmasto-olosuhteita, jotta voidaan ennustaa ja arvioida tulevia ilmaston vaihteluita.

LÄHDELUETTELO

Bradley, R. S. (1999). *Paleoclimatology: Reconstructing Climates of the Quaternary*. Toinen painos. Academic Press. 613 s.

Brozinski, A. (16.10.2018). *Laattatektoniikka*. Haettu osoitteesta: <https://www.geologia.fi/2018/10/16/laattatektoniikka/>

Center for Science Education, UCAR. (2024). *What is atmosphere?* Haettu osoitteesta: <https://scied.ucar.edu/learning-zone/atmosphere/what-is-atmosphere>

Discovering Antarctica (ei pvm.). *Climate Change: past and future*. Haettu osoitteesta: <https://discoveringantarctica.org.uk/oceans-atmosphere-landscape/atmosphere-weather-and-climate/climate-change-past-and-future/>

Earle, S. (2019). *Physical geology*. Toinen painos. Victoria, B.C.: BCcampus. 837 s. Haettu osoitteesta: <https://opentextbc.ca/physicalgeology2ed/chapter/18-4-ocean-water/>

Encounter Edu. (ei pvm.). *Why is thermohaline circulation so important?* Haettu osoitteesta: <https://encounteredu.com/multimedia/images/why-is-thermohaline-circulation-so-important>

Geologyscience.com. (10.11.2023). *Milankovitch Cycles*. Haettu osoitteesta: <https://geologyscience.com/geology-branches/historical-geology/milankovitch-cycles/>

Hubertus, F., Wahlen, M., Smith, J., ym. (1999). *Ice Core Records of Atmospheric CO₂ Around the Last Three Glacial Terminations*. Science, volume 283, s. 1712-1714. DOI: 10.1126/science.283.5408.1712

Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC. (2023). *Climate Change 2023: Synthesis Report*. Haettu osoitteesta: https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

IPCC. (2007). *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*. Haettu osoitteesta: https://www.researchgate.net/publication/224017972_Climate_Change_2007_The_Physical_Science_Basis_Working_Group_I_Contribution_to_the_Fourth_Assessment_Report_of_the_IPCC

Ilmatieteen laitos. (ei pvm.) *Auringonpilkut*. Haettu osoitteesta: <https://www.ilmatieteenlaitos.fi/auringonpilkut>

Lowe & Walker. (1997). *Reconstructing Quaternary Environments*. Toinen painos. Routledge. 446 s.

Lunkka, J. P. (2008). *Maapallon ilmastohistoria: Kasvihuoneista jääkausiin*. Gaudeamus Helsinki University Press. 286 s.

Masson-Delmotte, V., Kageyama, M., Braconnot, P., ym. (2006). *Climate Dynamics. Past and future polar amplification of climate change: climate model intercomparisons and ice-core constraints*. Quaternary Science Reviews, volume 26, s. 513–529. DOI: 10.1007/s00382-005-0081-9

National Aeronautics and Space Administration, NASA. (ei pvm.). *What types of data do scientists use to study climate?* Haettu osoitteesta: <https://climate.nasa.gov/faq/34/what-types-of-data-do-scientists-use-to-study-climate>

National Oceanic and Atmospheric Administration, NOAA. (2023). *The Hydrologic Cycle*. Haettu osoitteesta: <https://www.noaa.gov/jetstream/atmosphere/hydro>

NOAA. (2024). *What are El Niño and La Niña?* Haettu osoitteesta: <https://oceanservice.noaa.gov/facts/ninonina.html>

NOAA. (2024). *Climate Change: Atmospheric Carbon Dioxide*. Climate.gov. Haettu osoitteesta: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/climate-change-atmospheric-carbon-dioxide>

Nevanlinna, H. (2000). Aurinko ja ilmaston lämpeneminen. *Tieteessä tapahtuu*, 18(6), s. 12–13. Haettu osoitteesta: <https://journal.fi/tt/article/view/58254?acceptCookies=1>

Nevanlinna, H. (2012). *Auringon aktiivisuus ja ilmastonmuutos*. Ilmatieteen laitos. Haettu osoitteesta: <https://helda.helsinki.fi/server/api/core/bitstreams/e880403e-36a0-4f14-b004-1f36de15e553/content>

SMS Tsunami Warning. (ei pvm.). *Earthquakes: Tectonic Plates*. Haettu osoitteesta: https://www.sms-tsunami-warning.com/pages/tectonic-plates#.ZC_wAHZBy3A

Solanki, S. (2003). *Sunspots: An overview*. The Astronomy and Astrophysics Review, volume 11, s. 153–286. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00159-003-0018-4>

Voosen, P. (2.7.2020). *Greenland drilling campaign aims for bedrock to trace ice sheet's last disappearance*. Science.org. Haettu osoitteesta: <https://www.science.org/content/article/greenland-drilling-campaign-aims-bedrock-trace-ice-sheet-s-last-disappearance>

Walker, J. C. G., Hays, P. B., and Kasting, J. F. (1981). *A negative feedback mechanism for the long-term stabilization of Earth's surface temperature*. J. Geophys. Res., volume 86(C10), s. 9776–9782. DOI: [10.1029/JC086iC10p09776](https://doi.org/10.1029/JC086iC10p09776).

West, A.J., Galy, A., Bickle, M. (2005). *Tectonic and climatic controls on silicate weathering*. Earth and Planetary Science Letters, volume 235, issue 1–2, s. 211–228. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2005.03.020>