

MIKÄ MUUTTUU, KUN ILMASTO MUUTTUU?

Säätilasta puhuttaessa “miesmuisti” ulottuu muutaman vuoden päähän. Siksi sellaiset lausahdukset kuin “tällaista pakkasta ei ole ollut miesmuistiin” kannattaa yleensä jättää huomiotta; todennäköisesti pari talvea sitten oli tämänpäiväistä kovempi pakkanen. Säämuistin epäluotettavuudesta huolimatta uskon, että kuluvan talven säätila on ollut epätavallinen.

Lehtien sääkatsausten yhteydessä annetut pitkän ajan vertailuluvut eivät anna mahdollisuutta tarkistaa, onko mielikuvani oikea vai väärä. En nimittäin tarkoita poikkeuksellisia lämpötiloja: kylmä on ollut tänä talvena vähemmän kylmää, ja leuto on ollut tänä talvena vähemmän leutoa kuin ääritilanteissa viime vuosien aikana. Sen muistan aivan hyvin. En myöskään tarkoita keskilämpötilaa, joka ei tavattomasti poikkea pitkän aikavälin keskiarvosta. Tarkoitan säätilan vaihtelun laatua: ensiksi oli kylmää jo alkutalvesta, erityisesti vuoden vaihteen aikoihin; sitten oli viikon vesisade; tammikuun jälkipuolella oli taas runsaita lumisateita ja kylmää; sitten oli jälleen parin viikon vesisadejakso, joka huipentui helmikuun puolivälissä aprillipäivän kevätsään; ja tätä kirjoitusta viimeistellessäni helmikuun loppupäivinä säätilaa hallitsee jälleen jäämereinen, kohtuullisen kylmä virtaus. Toisin sanoen polaariset, jopa arktiset ilmamassat ja atlanttiset lauhat säärintamat ovat vaihdelleet Suomenniemen säätilassa läpi talven muutaman viikon jaksoissa. – Niinpä jankutan mielessäni, että “näin äärimmäisiä säätilan vaihteluita läpi koko talven ei ole ollut miesmuistiin.”

Mikä on säätilaa kuvattaessa olennaista? Pitkän aikavälin keskiarvot kuten vuotuisen keskilämpötila ovat hyviä tunnuslukuja kuvaamaan ilmaston eroja maapallon eri osien välillä. Keskilämpötila ilmaisee epäsuorasti potentiaalia, jonka tietyn alueen ilmasto-olosuhteet tarjoavat elollisen luonnon kasvuvoimalle. Vuoden keskilämpötila ja keskimääräinen sademäärä yhdessä esimerkiksi ennustavat hämmästyttävän tarkasti maapallon kasvillisuusvyöhykkeiden sijainnin.

Koko vuoden keskilämpötila on kuitenkin myös harhaanjohtava tunnusluku. Esimerkiksi mereisyyden ja mantereisuuden olennainen ero häviää sen alle. Ilmaston ominaispiirteinä yhtä tärkeitä kuin keskiarvot ovat vaihtelun jakautumat. Niinpä jo

vuotuisen keskilämpötilan täydentäminen kylmimmän ja kuumimman kuukauden keskilämpötiloilla auttaa olennaisesti täsmentämään kuvaa tietyn seudun ilmastosta. Toinen tärkeä seikka on vaihtelun ajallinen säännöllisyys. Tärkein ja säännönmukaisin vaihtelu noudattaa luonnollisesti vuodenaikaisuutta, jonka perustana on maapallon kiertoradan geometria. Vuodenajat eivät kuitenkaan koskaan toistu täsmälleen samanaikaisina, ja maapallon monilla seuduilla esimerkiksi kuivien ja sateisten jaksojen vaihtelu on vain löyhästi sidoksissa vuodenaikaisvaihteluun.

Mutta palatkaamme kuluvaan talveen. Ilmatieteilijät sanovat, että atlanttiset matalapaineet ovat koko 90-luvun ajan olleet lämpimämpiä kuin aikaisempina vuosikymmeninä keskimäärin; tämän seurauksena Luoteis-Euroopan talvet ovat olleet myrskyisiä, sateisia ja lauhoja. Atlantin valtamerialtaan pohjoisosissa on siis enemmän lämpöenergiaa kuin aiemmin keskimäärin. – Mistä on kyse? Onko Atlantin lämpeneminen osoitus ilmaston pysyvistä lämpenemisestä koko maapallon mitassa? – Sitä juuri ei tiedetä. Luontaisen vaihtelun mahdollisuutta on vaikea sulkea pois. Maapallon ilmastossa ilmenee nimittäin luonnostaan vuosien ja vuosikymmenten aikamittakaavassa sellaista heilahtelua, joka saattaa hyvinkin selittää Atlantin merialtaan pohjoisosien 1990-luvulla todetun lämpenemisen.

* * * * *

Miksi maapallolla on “ilmasto”? Vastaus on periaatteessa yksinkertainen. Auringon säteily lämmittää maapallon pintaa päiväntasaajan seudulla paljon enemmän kuin navoilla. Ilmasto syntyy ilmavirtauksista ja merivirroista, jotka tasoittavat tätä eroa välittämällä lämpöä päiväntasaajalta kohti napoja. Säteilyn intensiteetin vaihtelu maapallon eri osissa johtuu ensisijassa geometriasta: säteily tulee päiväntasaajalla maan pintaan nähden kohtisuoraan mutta napojen lähellä hyvin viistoon, joten säteilyä tulee pinta-alayksikköä kohden päiväntasaajalle kaikkein eniten. Lisäksi kohtisuoraan tulevasta säteistä heijastuu takaisin avaruuteen pienempi osa kuin viistoista. Niinpä aurinko lämmittää esimerkiksi suomalaisten järvien vettä loppukesää kohden yhä heikommin, vaikka päivät olisivat pilvettämiä. Kansansanonta Jaakosta ja kylmästä kivistä on itse asiassa varsin osuva, vaikka lehtien tiedetoimittajat muistavat sitä joka vuosi jostakin kummallisesta syystä pilkkata.

Ilmavirtaukset ja merivirrat kuljettavat kummatkin noin puolet siitä lämpömäärästä, joka siirtyy päiväntasaajan seuduilta pohjoiseen ja etelään. Ilman ja veden lämmön-siirto-ominaisuuksissa on kuitenkin olennainen ero: ilma ei sido lämpöä kovin tehokkaasti mutta ilmavirtaukset ovat nopeita, kun taas vesi sitoo lämpöä tehokkaasti mutta merivirrat ovat hitaita. Tämä ero vaikuttaa suuresti ilmaston dynamiikkaan. Lisäksi ilmastoon vaikuttaa olennaisesti ilmakehän koostumuksen määräämä niin sanottu kasvihuoneilmiö: useat ilmakehän kaasut pidättävät osan maapallosta lähtevästä lämpösäteilystä joksikin aikaa alailmakehään, minkä seurauksena maapallon lämpötila on korkeampi kuin jos säteily häviäisi suoraan avaruuteen. Kasvihuoneilmiö on ilmakehän luonnollinen ominaispiirre. Esimerkiksi planeetta Venuksen hiilidioksidipitoinen ilmakehä tuottaa paljon maapalloa voimakkaamman kasvihuoneilmiön.

Osa lämpöä siirtävistä ilmavirtauksista on sängen säännöllisiä (ks. Rinne et al. 1998). Esimerkiksi niin sanottu Hadleyn kierto: päiväntasaajan seudulla lämpenevä ilma kohoaa ylöspäin, kiertyy ilmakehän yläkerroksissa kohti napoja, laskeutuu takaisin maan pinnan tuntumaan hepoasteiden kohdalla (noin 30° pohjoista ja eteläistä leveyttä), ja virtaa pasaatituulina takaisin päiväntasaajalle. Maapallon pyörimisliikkeen

tuottaman coriolisvoiman vaikutuksesta tuulet kuitenkin kiertyvät pohjoisella pallonpuoliskolla oikealle ja eteläisellä vasemmalle: päiväntasaajan pohjoispuolella puhaltaa koillispassaati ja eteläpuolella kaakkoispassaati.

Päiväntasaajan seudulla ilmakehässä on myös merkittäviä itä-länsisuuntaisia kierto- liikkeitä, jotka ovat seurausta mannerten ja merien keskinäisestä sijainnista, mutta Hadleyn kierto hallitsee lämmön siirtymistä ilman välityksellä pois päin päiväntasaajalta. Ilmakehän kiertojen yksityiskohdat määräävät toisen paikallisten ilmastojen keskeisen piirteen: sademäärän ja sen vuodenaikaisjakautuman.

Hadleyn kierron pohjois- ja eteläpuolella sijaitsevat voimakkaiden länsituulten vyöhykkeet, jotka ovat myös seurausta coriolisvoimasta. Erityisen tärkeitä ovat runsaan 10 kilometrin korkeudessa vallitsevat niin sanotut suihkuvirtaukset. Länsituulet ilmenevät eri pallonpuoliskoilla erilaisina, koska mantereet ja meret sijaitsevat niillä toisiinsa nähden täysin eri asennoissa. Etelässä länsituulet puhaltavat jokseenkin säännöllisenä kehänä maapallon ympäri lauhkealla vyöhykkeellä sijaitsevaa yhteinäistä merialuetta seuraten. Pohjoisessa mantereiden ja merien vuorottelu länsituulten vyöhykkeellä sen sijaan sotkee tuulten säännöllisyyden. Suihkuvirtauksiin muodostuu ”seisova aalto”, eli tuulet eivät puhalla suoraan lännestä itään vaan mutkittelevat.

Eräs pohjoisen pallonpuoliskon suihkuvirtausten mutkittelun tärkeä seuraus on, että Atlantin merialtaan pohjoisosiin muodostuu lännestä itään liikkuvia voimakkaiden matalapaineiden vyöhyke, niin sanottu myrskyrata. Atlantin myrskyrataa seuraavat matalapaineet saavat alkunsa New Foundlandin edustalla ja liikkuvat itäkoilliseen matkan varrella voimistuen. Atlanttiset matalapaineet hallitsevat Luoteis-Euroopan säätilaa etenkin talvisin. Suomikin kuuluu Atlantin myrskyradan vaikutuspiiriin vaikkakin sen mantereisella laidalla; atlanttiset myrskyt ovat Brittein saarilla, Tanskassa ja Norjassa aina voimakkaampia kuin meillä.

Myös vuodenaikojen vaihtelu sekoittaa luonnollisesti olennaisesti ilmavirtausten säännöllisyyttä. Maapallon intensiivisimmän lämpenemisen vyöhyke on jouluna etelässä kauriin kääntöpiirillä ja juhannuksena pohjoisessa kravun kääntöpiirillä. Ilmasto- vyöhykkeet eivät suinkaan siirry hyvässä järjestyksessä pohjoiseen ja etelään vuodenaikojen mukaan. Järjestyneen siirtymisen sotkee mantereiden ja merten keskinäisten sijaintien epäsäännöllisyys. Lisäksi vuodenaikaisuuden vaikutusta muuntaa olennaisesti vesistöjen hyvä lämmönsitomiskyky ja merivirtojen vakaus. Esimerkiksi Pohjois- Atlantin lämmin merivirta, Golfvirta, jatkaa tietysti kulkuaan kesät talvet ja aiheuttaa sen tunnetun seikan, että lauhkean vyöhykkeen kasvillisuus ulottuu Luoteis-Euroopassa napapiirille asti kun taas Pohjois-Amerikassa on vastaavilla leveysasteilla arktista tundraa ja Grönlannissa mannerjäätikkö. Golfvirran vaikutus ei ulotu Pohjois-Amerikan mantereelle lainkaan, koska vallitsevat ilmavirtaukset kulkevat Pohjois-Atlantilla lännestä itään.

* * * * *

Luonnontieteen historiassa ”ilmasto” syntyi sanan nykyisessä merkityksessä 1700-luvulla. Tosin luonnontutkijat ovat olleet kautta aikojen kiinnostuneita säästä. Aristoteleen korpukseen sisältyy teos *Meteorologica*, ja modernin luonnontieteen perustanlaskijoista esimerkiksi Descartes kirjoitti säätilasta erillisen tutkielman *Les Meteores*. Ilmakehän dynamiikkaa oli kuitenkin mahdotonta ymmärtää ennen kuin oli muodostunut jonkinasteisen luotettava näkemys ilman, veden ja lämmön fyysikaalisesta luonteesta. Lisäksi aivan olennainen merkitys oli 1600-luvun lopusta lähtien käynnistyneellä

järjestelmällisellä havainnoinnilla. Meteorologia on olennaisesti havaintoihin nojautuva empiirinen tiede.

Modernin meteorologian ensimmäisessä vaiheessa 1700-luvulla muotoutui näkemys, että ilmakehän liikkeitä hallitsevat suuren mittakaavan säännölliset virtaukset kuten Hadleyn kierto päiväntasaajan molemmiin puolin. Omaksuttiin myös näkemys, että säätilan paikallinen vaihtelu on välittömässä yhteydessä koko maapallon kattaviin ilmavirtauksiin. Ilman laajaa havaintoverkostoa ei paikallisen säätilan yhteyttä globaaliin ilmastoon olisi mitenkään voitu osoittaa todeksi. Lisäksi tarvittiin tietenkin luotettavia menetelmiä arvioida eri paikkakuntien sääilmiöiden keskinäistä ajoittumista.

Meteorologian ”toinen vallankumous” (Stevens 1999) ajoittuu 1900-luvun alkuun. Tuolloin ilmakehän liikkeiden analysointiin ryhdyttiin soveltamaan nesteiden dynamiikan perussuureita (paine, tiheys, virtaus, jne.). Vuosisadan alkupuolella vakiintui käyttöön nykyisinkin säätilan ennustamisen perustana käytetty matemaattinen metodologia. Laskentamenetelmien tehokas soveltaminen tuli kuitenkin muuttujien valtavan määrän vuoksi mahdolliseksi vasta modernin tietojenkäsittelyn myötä 1950-luvulta lähtien. Nykyiset globaalit ilmastomallit perustuvat olennaisesti samoihin menetelmiin.

1900-luvun jälkipuoliskolla ilmastosta on tullut paradigmaattinen esimerkki kaoottisesta systeemistä eli monimutkaisesta ja epälineaaristen vuorovaikutusten hallitsemasta kokonaisuudesta, jonka tuleva kehitys on äärettömän herkkä alkuarvoille. Ilmaston kaoottisen luonteen keksimisen tarina on kerrottu lukuisia kertoja (esim. Lorenz 1993). Keskeinen asema tarinassa on meteorologi Edward Lorenzillä, joka muun muassa otti käyttöön termin ”perhosefekti” metaforana sille, että olemattoman vähäiset muutokset ilman paikallisissa virtauksissa voivat vaikuttaa olennaisesti säätilan tulevaan kehitykseen; Lorenzin vuonna 1972 pitämä esitelmä ”Predictability: Does the Flap of a Butterfly’s Wings in Brazil Set off a Tornado in Texas” on liitteenä hänen 1993 kirjassaan. Lorenz oivalsi ilmakehän dynamiikan kaoottisuuden selvittäessään säätilan ennustamiseen kehitettyjen laskennallisten mallien käyttäytymistä. Toisin sanoen, meteorologian lähistoriaan sisältyy paradoksi: tehokkaat laskentamenetelmät, joiden avulla alun perin pyrittiin lisäämään pitkän aikavälin sääennusteiden luotettavuutta, osoittivat pitkän aikavälin luotettavan ennustamisen mahdottomaksi. – Vastaavia paradokseja on ilmennyt eri muodoissa muidenkin tutkimusalojen kehityksessä.

Koska ilmakehän liikkeiden dynamiikka on kaoottista, säätilan täsmällinen ennustaminen kovin pitkälle tulevaisuuteen on periaatteessa mahdotonta. Ennustaminen on kuitenkin luotettavaa lyhyessä aikamittakaavassa. Kaoottisilla prosesseilla on ominainen ennustettavuuden horisonttinsa. Säätilan ennustettavuuden horisontti ulottuu korkeintaan kahden viikon mutta käytännössä useammin ehkä neljän-viiden vuorokauden päähän. Paikalliselle säätilalle on yleensä ominaista lyhytaikainen vakaus. Suomessa suhteellinen vakaus kattaa muutaman päivän: jos siis ennustan johdonmukaisesti huomiseksi suunnilleen samanlaista säätä kuin mikä vallitsee tänään, ennusteeni osuvat oikeaan useammin kuin vikaan.

Jyrkkien säätilan muutosten ennustaminen on kuitenkin erityisen vaikeaa. Ilmatieteen laitoksen sääennusteiden tekijät selvisivät syksyn 2001 myrskyistä sangen hyvin. Kuuluisa epäonnistuminen on Englannin sääpalvelun kyvyttömyys ennakoida vuoden 1987 lokakuun hirmumyrskyä, joka on mainittu Brittein saarten voimakkaimmaksi sitten vuoden 1703. Myös säähäiriöiden kehityksellä on ominainen aikahorisonttinsa. Kuten edellä totesimme, Luoteis-Euroopan matalapaineet syntyvät yleensä Pohjois-Atlantin myrskyradalla, ja jokaisen myrskyksi kehittyvän matalapaineen kehityskaari

kestää useita päiviä. Mikäli siis myrskyradan ominaispiirteet tunnetaan riittävän hyvin, myrskyt voidaan ennakoida muutaman vuorokauden aikamittakaavassa. Aina voi kuitenkin ilmaantua poikkeuksia. Englannin vuoden 1987 katastrofi oli vaikeasti ennustettava ilmeisesti siksi, että se oli alkuperältään pikemminkin trooppinen hurrikaani kuin Pohjois-Atlantin tavanomainen säähäiriö.

1900-luvun jälkipuoliskolla tuli myös ilmeiseksi, että usean vuoden tai jopa vuosikymmenen aikamittakaavassa toistuvat säätilan syklit ovat erittäin tärkeä osa maapallon ilmastoa. Syklit vaikuttavat suursäätilaan laajoilla alueilla. Merivirroilla ja ilmanpaineen suuren mittakaavan vaihtelulla on keskeinen osuus niiden dynamiikassa. Tunnetuin usean vuoden epäsäännöllistä sykliä noudattava suuren mittakaavan ilmiö on El Niño -oskillaatio Tyynellä valtamerellä (tekniseltä nimitykseltään *El Niño Southern Oscillation*, ENSO). Vastaavanlainen mutta huonommin tunnettu oskillaatio ilmenee Pohjois-Atlantilla (*Northern Atlantic Oscillation*, NAO). ENSO-heilahtelulla on maapallon eri osiin ulottuvia odottamattomia "kaukoyhteyksiä", jotka ovat toistuneet 1900-luvun loppupuolella samantyyppisinä. El Niño huippuvuosien pohjoisen pallonpuoliskon talvella esimerkiksi on yleensä todettu eri puolilla maailmaa seuraavanlaisia poikkeuksellisia sääilmiöitä: kuivaa ja kuumaa Afrikan kaakkoisosissa, Indonesiassa ja Pohjois-Brasiliassa; lauhaa Intiassa, Japanissa, Pohjois-Amerikan luoteis- ja koillisosissa sekä Kaakkois-Australiassa; sateista itäisessä Keski-Afrikassa, Melanesiassa ja Brasilian eteläosissa; ja viileää ja sateista Yhdysvaltojen kaakkoisosissa. Nämä poikkeussäätilat seuraavat siitä, että El Niño muuttaa lämmön siirtymistä päiväntasaajalta lauhkeille vyöhykkeille Hadleyn kierron välityksellä. Koska ENSO-heilahtus kestää useita vuosia, sen alkaminen on periaatteessa ennustettavissa ehkä vuoden aikamittakaavassa, mutta yksittäisten syklien kaukovaikutusten yksityiskohdat ovat ennustamattomia (Glanz 1996, Rinne et al. 1998).

* * * * *

Vaihtelu on säätilan olennainen ominaisuus. Välitöntä kokemustamme hallitsevat päivän ja yön vaihtelu sekä vuodenaikaiskierto, jotka ovat seurausta maapallon liikkeiden geometriasta. Niiden ohella sään vaihtelu päivän mittaan sekä päivästä toiseen on kokemuspiirissämme luonnollinen seikka. Ilmiselvää on myös, että vuodet eroavat toisistaan. Lehdet puhkeavat ja ensilumi sataa joinakin vuosina aikaisin, toisina myöhään.

Entä pidempiaikainen vaihtelu? Sen havaitseminen on paljon vaikeampaa kuin säätilan välittömän vaihtelun. Vaikeus ei johdu yksilöllisen säämuistin epäluotettavuudesta vaan siitä, että pitkän aikavälin muutos ei ole hetkellisessä säätilassa näkösällä. Pitkäaikaisen muutoksen voimme havaita vain käyttämällä apuna sellaisia fysikaalisen ympäristön piirteitä, jotka keräävät säähavaintoja kumulatiivisesti. Kesän lämpötilan hyvä mittari on esimerkiksi lämpöä vaativien kasvien kuten tomaatin tai maissin kasvu. Lapissa kesän lämpimyyttä mittaa erinomaisesti männyn siementen kypsyminen, minkä riippuvuus koko kasvukauden aikana kertyvästä "lämpösummasta" on tiedetty pitkään. Männyn siemensadon vaihtelun välityksellä lämpimät kesät jättävät jäljen Lapin metsien ekologiseen muistiin: hyvien siemenvuosien tuottamat taimistot erottuvat vuosikymmenten ajan erillisinä ikäluokkina perä-Lapin männiköissä.

Monet ympäristön fysikaaliset piirteet keräävät kumulatiivisesti havaintoja myös talvilämpötiloista. Hyvä esimerkki on Itämeren jääpeitteen laajuus, joka on erilaisten aineistojen nojalla kyetty rekonstruoimaan vuodesta 1720 lähtien (Rinne et al. 1998,

198). Tilasto osoittaa suurta vaihtelua vuosien välillä. Aikasarjasta syntyy myös vaikutelma, että vaikeat ja helpot jäätalvet sijoittuvat ryppäiksi. – Mutta kuten tunnettua, mikään ei ole epäluotettavampaa kuin arvioida aikasarjan tilastollisia säännönmukaisuuksia paljaalla silmällä.

Säätilan pitkäaikaisten vaihtelusykkien havaitsemiseen tarvitaan sellaisia ympäristön osoittimia, jotka keräävät havaintoja monien vuosien ajalta. Jäätiköiden laajeneminen vs. supistuminen on tunnettu ja paljon käytetty säätilan pitkäaikaisvaihtelun osoitin. Myös ekologisten kokonaisuuksien ominaispiirteet tarjoaisivat pitkäaikaisen vaihtelun todentamiseen mahdollisuuksia, mutta niiden osalta on osittain epäselvää, mitä oikeastaan pitäisi havainnoida. Hyvä säätilan kehityksen mittari olisi koko kasvukauden aikana syntyneen uuden biomassan määrä ja jakauma eri lajien kesken, mutta sen arvioiminen on ekosysteemien paikallisen vaihtelun vuoksi tavattoman vaikeaa. Viime vuosikymmenten keskimääräisen säätilan trendinomaista muutosta on menestyksellisesti arvioitu käyttäen tiettyjen lajiryhmien ominaispiirteitä kuten esimerkiksi perhosten levinneisyyttä ja lintujen pesinnän alkamisajankohtaa.

* * * * *

Säätila siis vaihtelee, mutta voiko ilmasto vaihdella? – Pitkälle 1900-luvulle oletettiin automaattisesti, että ilmasto on olemuksellisesti vakaa (Lamb 1982). Niinpä kansainvälinen meteorologinen järjestö (nykyisen WMO:n edeltäjä) standardoi ilmaston vuonna 1935 pitämässään kokouksessa määrittelemällä vuosien 1901–30 aikavälin “normaalin ilmaston kaudeksi”. Oletettiin siis, että säätila ja ilmasto ovat kaksi eri asiaa: edellinen vaihtelee mutta jälkimmäinen ei.

Vuosisadan loppua kohden käsitys muuttui täysin. Ilmasto on kompleksi ja epälineaarinen dynaaminen systeemi, eikä ole mitään syytä uskoa sen pysyvän olemuksellisesti vakaana. Itse asiassa muuttumattomuuden käsityskantaa on jälkikäteen arvioiden vaikea ymmärtää, koska monet 1800-luvulta lähtien tunnetut seikat puhuvat sitä vastaan. Tärkeimmän vasta-argumentin muodostavat jääkauden aikaiset jyrkät ilmastomuutokset, joista oli oltu geologisen aineiston nojalla perillä jo pitkään. Serbialainen matemaatikko Milutin Milankovic esitti 1920-luvulla, että jääkausien ilmastomuutokset selittyvät maapallon kiertoradan geometriassa ilmenevän syklisen vaihtelun nojalla. Kiertoradan muutokset eivät vaikuta maapallolle tulevan kokonaissäteilyn määrään, mutta säteilyn jakauma maapallon eri osiin muuttuu. Tämä voi aiheuttaa lämpöä välittävissä ilmavirtauksissa ja merivirroissa suuria ja ilmeisen nopeita muutoksia (Alley 2000).

Onkin ilmeistä, että ilmaston muuttumattomuuden olettamus on aikoinaan saanut tukea yleisemmistä metafysisistä uskomuksista. Jos maailman yleisesti ottaen kuvitellaan olevan tasapainotilassa, on tietysti oltava mahdollista määritellä sitä luonnehtiva “normaali luonnontila”. Tällainen vaistomainen uskomus on edelleen ympäristöajattelun merkittävä piirre. Lisäksi on ollut vaikea saada sovitetuksi yhteen suuret mullistukset kuten jääkausivaihtelut ja tässä ja nyt tapahtuvat säätilan vähäiset heilahtelut saman teoreettisen käsitteistön piiriin. Geologian ja evoluutioteorian piirissä on koettu vastaava ongelma. Ongelman ratkaisuksi hyväksyttiin periaatteessa jo 1800-luvulla geologi Charles Lyellin nimeen liittyvä “uniformitarismi” eli olettamus, että mullistukset syntyvät samojen tekijöiden vaikutuksesta kuin vähittäiset muutokset tässä ja nyt. Muutosten erilaisten aikamittakaavojen sovittaminen yhteen on kuitenkin ollut vaikeaa. Itse asiassa vasta epälineaaristen systeemien ennakoimattomuutta korostava kaaosteoria

onkin saanut uniformitarismin uskottavaksi osoittaessaan, että tässä ja nyt tapahtuvan muutoksen ennakoimattomuus voi olla ituna suurille mullistuksille.

Empiirinen aineisto ilmaston muinaisista mullistuksista on olennaisesti rikastunut 1900-luvun loppuvuosikymmeninä. Tärkeitä tutkimustuloksia ovat tuottaneet erityisesti Grönlannin ja Etelämantereen jäätiköiden sekä valtamerten pohjasedimenttien kairaukset: muinainen säätila voidaan kemiallisten osoittimien avulla rekonstruoida hämmästyttävän tarkasti kymmenien ja satojen tuhansien vuosien taakse (Alley 2000). Analyysit osoittavat, että jyrkät muutokset ilmasto-oloissa ovat usein tapahtuneet tavattoman nopeasti. Hyvän esimerkin tarjoaa niin sanottu nuorempi Dryas -jakso, jonka aikana Skandinavian mannerjäätikön vetäytyminen pysähtyi noin 1300 vuodeksi; jakso alkoi noin 12 800 ja päättyi noin 11 500 vuotta sitten. Samanaikaisesti myös muiden mantereiden ilmastot kokivat suuria muutoksia. Grönlannin mannerjään jääkerrostumien nojalla on arvioitu, että nuorempi Dryas päättyi ehkä 40 vuoden kuluessa mutta ratkaiseva muutos tapahtui parin-kolmen vuoden aikana.

Nämä muinaisia ilmastonmuutoksia koskevat havainnot osoittavat, että ilmakehän ja valtamerten kierrot muodostavat globaalin kokonaisuuden, jonka koko rakenne voi muuttua ratkaisevasti. Tärkein pohjoisen ja eteläisen pallonpuoliskon ilmastoja yhteen nivova tekijä on valtamerten merivirtojen muodostama ”liukuhihna”. Sen käyttövoima on Atlantilta käynnistyvä niin sanottu termohaliinivirtaus. Kylmä ja suolapitoinen vesi vajoaa Pohjois-Atlantilla pohjasyvänteeseen ja virtaa sitä pitkin eteläiselle pallonpuoliskolle, missä se nousee takaisin pintaan ja lämpenee. Termohaliinivirtaus vetää lämmintä pintavettä Golfvirtana pitkälle pohjoiseen Atlantin valtamerialtaalla; Tyynen meren altaalta vastaava mekanismi puuttuu. Uskottava ja nykyisin laajalti hyväksytty selitys jääkauden jyrkille ja äkillisille ilmastonmuutoksille on se, että termohaliinivirtauksessa voi tapahtua olennaisia, maailmanlaajuisesti vaikuttavia muutoksia Atlantin pohjoisosissa tapahtuvien paikallisten muutosten seurauksena (Rinne et al. 1998, Alley 2000).

Maapallon ilmastohistoriaan sisältyy myös jääkausisyklejä pitkäaikaisempaa vaihtelua, jota ovat aiheuttaneet yhtäältä mannerten liikkeet ja toisaalta kasvihuoneilmän voimakkuuden muutokset ilmakehän koostumuksen vaihtelun myötä. Mannerten ja merien keskinäinen sijainti maapallolla vaikuttaa luonnollisesti olennaisesti siihen, millä tavoin merivirrat tasoittavat päiväntasaajan ja napojen välistä lämpötilaeroa. Mannerten sijainnilla on olennainen merkitys maapallon ilmastolle myös tällä hetkellä, kuten jo edellä totesimme. Pohjoinen ja eteläinen pallonpuolisko ovat perusilmastoltaan erilaisia. Etelässä on napamanner, jota ympäröi avoin meriväylä. Pohjoisessa on navalla laajojen mantereiden lähes täysin eristämä ”sisämeri”. Vaihteluväyhykkeet polaarilmastosta lauhkeaan ilmastoon ovat epävakaista ja myrskyisiä, mutta eri pallonpuoliskoilla eri tavoin.

* * * * *

Tehkäämme väliyhteenveto: Ilmasto on historiallisesti vaihdellut erittäin paljon, useassa eri aikamittakaavassa. Kaikki muutoksen laadut ovat koko ajan käynnissä ja ovat keskenään epälinearisessa vuorovaikutuksessa. Ilmasto on hyvä esimerkki monimutkaisesti systeemistä, jossa useita eri vaihtelun mittakaavoja on jäsentynyt ikään kuin sisäkkäin. Mannerten keskinäinen sijainti, ilmakehän koostumus, merivirtojen kulku sekä ilmavirtausten ja sateiden jakautuminen ovat vaihdelleet jatkuvasti ominaisissa aikamittakaavoissaan ja olennaisesti globaalisti. Myös eri mittakaavoissa tapahtuvat säätilan vaihtelut jäsentyvät toisiinsa nähden sisäkkäisiksi tasoiksi (Rinne et al. 1998, 34).

Vaihtelun mittakaavat eivät kuitenkaan erotu toisistaan siisteinä kerrostumina kuten venäläisen nukan kuoret. Eri mittakaavassa tapahtuvien prosessien vuoro-vaikutukset ovat epälineaarisia. Suuret yllätykset liittyvät eri mittakaavatasojen keskinäisten välitysten dynamiikkaan. Lorenzin “perhosefekti” on murroskohtien dynamiikan ennakoimattomuutta kuvaava metafora: perhosen siipien aiheuttama, pientäkin pienemmän mittakaavan häiriö voi moninkertaistua toiselle mantereelle tornadoksi. Suuri muutos voi syntyä mitättömän pienen alkusysäyksen seurauksena.

* * * * *

Edellä esitetyn nojalla olisi aika kummallista ajatella, että inhimilliset toimet eivät voi vaikuttaa ilmastoon.

Ruotsalainen kemisti Svante Arrhenius esitti 1890-luvulla oletuksen, että ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden vaihtelu vaikuttaa kasvihuoneilmion välityksellä maapallon lämpötilaan. Hän esitti myös ensimmäiset laskelmat siitä, että inhimilliset toimet – erityisesti metsien raivaus ja kivihiihen polttaminen – ovat lisänneet hiilidioksidin määrää ilmakehässä ja voivat siten johtaa ilmaston vähittäiseen lämpenemiseen. Toisaalta 1800-luvun loppupuolelta lähtien oli myös vahvistunut näkemys, että ihmistoimet muodostavat yhteenlaskettuina geologisen voiman, joka on muuttanut maapallon ilmettä jo vuosisatojen ajan; tämän ajatuksen klassikko on Georg Perkins Marshin kirja *Man and Nature, Or, Physical Geography as Modified by Human Action* (1864).

Määrätietoisen tutkimuksen kohteeksi ihmistoimista aiheutuva ilmaston muuttuminen nousi 1980-luvulla. Kansainvälinen ilmastotutkijoiden yhteistyöelin *Intergovernmental Panel for Climate Change* (IPCC) perustettiin 1988. Se on julkaissut kolmiosaisen katsauksen ilmastomuutokseen vuosina 1990, 1995 ja 2001; viimeisimpien katsausten yhteenvedot ovat luettavissa internetissä osoitteessa <http://www.ipcc.ch/>.

IPCC on toistanut raporteissaan yhä painokkaammin näkemyksen, että ihmisperäinen ilmastomuutos on tapahtunut tosiasia. Kuten tunnettua, IPCC:n arvio ei nauti täysin jakamatonta kannatusta. Erimielisyyksissä pitäisi erottaa toisistaan kaksi asiaa: yhtäältä näkemys kasvihuoneilmioista maapallon ilmastoa määräävänä tärkeänä mekanismina, ja toisaalta ilmastomuutoksen todentaminen havaintojen nojalla. Ilmastomuutoksen todentaminen tilastollisen päättelyn sääntöjä noudattaen on vaikeaa, koska kaikkia ilmaston luontaisen vaihtelun ulottuvuuksia tuskin vielä edes tunnetaan saati että niiden tilastolliset ominaisuudet hallittaisiin. Yksityiskohtien ennakoiminen on erityisen hankalaa sellaisilla ilmastovyöhykkeiden rajalla sijaitsevilla alueilla kuten Suomi (Kuusisto et al. 1996). Siksi ilmastoa määräävien mekanismien tuntemus on olennaista. Mitä paremmin mekanismeja on opittu tuntemaan, sitä merkittävämmiltä ihmistointen vaikutukset suhteellisesti ottaen vaikuttavat. IPCC:n hyväksymien johtopäätösten hylkääminen suoralta kädeltä on silkkää idiotismia.

Mitä ilmastomuutoksesta seuraa? – Ilmastolla on inhimillisten kulttuurien menestymiselle niin olennainen merkitys, että se jää helposti huomaamatta. Historiankirjoitus ei yleensä ole ottanut ilmastoa vakavasti. Laiminlyönnille on useanlaisia selityksiä. Lamb (1982) toteaa, että historioitsijat ovat kokeneet tarpeelliseksi erottautua suoraviivaisesta ympäristödeterminismistä. Laiminlyöntiä selittää myös aineiston vähäisyys. Historiallisesta aineistosta on vaikea suoraan lukea säätilan pitkäaikaismuutoksia kuvaavia signaaleja. Perinteisen maanviljelyksen piirissä ei tehty muistiinpanoja esimer-

kiksi kylvö- ja sadonkorjuuajan vaihtelusta. Epäsuorat osoittimet kuten viljan hinnan heilahtelu ja lämpöä vaativien viljelykasvien satoisuus – esimerkiksi viinisadon laatu – ovat tarjonneet aineistoa, jota esimerkiksi ranskalaiset annalistit kuten Fernand Braudel ja Le Roy Ladurie ovat hyödyntäneet. Niihin vaikuttavat kuitenkin muutkin kuin ilmastolliset tekijät. Ehkä ilmaston laiminlyönnin taustalla on ollut myös yleinen edistysusko: eihän ole ajateltavissa, että jokin niin triviaali seikka kuin satunnaisesti vaihtelevat ilmasto-olot todella vaikuttaisivat inhimillisen kulttuurin etenemiseen! Sivilisaation historia on vapautumista luonnonvoimien alaisuudesta. Joskin alkukantaiset kulttuurit olivat alttiita myrskyille, kuivuudelle, rankkasateille ja hallalle, moderni maailma on toki vapautunut ilmaston vaikutuspiiristä.

Ilmaston ja historian keskinäisten yhteyksien hahmottamista vaikeuttava käsitteellinen ongelma on erottaa *ilmasto* ja *säätila* toisistaan. Niin kauan kuin ilmasto tulkittiin vakaaksi ja säätila ymmärrettiin ohimenevinä, vaikkakin joskus äärimmäisinä vaihteluin vakaan keskiarvon ympärillä, oli vaikea edes jäsentää ilmaston ja historian suhdetta mielekkäänä tutkimusongelmana. Ympäristödeterminismi liittyy käsitteisiin ilmasto ja säätila hiukan eri muodoissa. Ilmaston ja kulttuuristen ominaispiirteiden keskinäisen suhteen pohdintaa raskauttaa vanha, antiikista asti periytyvä ajatus ilmaston ja kansanluonteen keskinäisestä riippuvuussuhteesta. Toisenlaista liioittelevaa determinismää edustaa historiallisten tapahtumien selittäminen poikkeuksellisten sääolojen nojalla. Ylilyöntien välttäminen ei kuitenkaan oikeuta sitä, että ilmastolle ja säätilalle ei anneta mitään osuutta historian kulussa.

Ilmaston merkitystä arvioivan historiallisen tutkimuksen ensimmäinen haaste on tutkimusongelman järkevä rajaus. “Pikku jääkausi” eli Pohjois-Euroopan ilmastohistoriassa erottuva, noin vuosiin 1300–1850 ajoittuva kylmä jakso on osoittautunut hedelmälliseksi tutkimuskohteeksi (esim. Fagan 2000). Pikku jääkauden aikana Keski-Euroopan vuoristojen jäätiköt kasvoivat, maanviljelyn tuottoisuus aleni, Atlantin kalastuksen painopisteet muuttuivat ja merenkulun olosuhteet vaikeutuivat poikkeuksellisten myrskyjen ja vesien kylmenemisen vuoksi, ja Viinimaan ja Grönlannin viikinkiasutukset hävisivät. Sääolot pysyivät erityisen epäsuotuisina vuosikausia yhteen menoon 1500-luvun loppuvuosikymmeninä, 1690-luvulla ja 1820-luvulla. – Eino Jutikkala (1987) esittää pikku jääkauden tapahtumista tiiviin yhteenvedon Pohjois-Euroopan näkökulmasta. Hänen yhteenvedostaan käy myös hyvin ilmi, miten vaikeaa on arvioida täsmällisesti tämänkin, monien lähteiden nojalla selvästi todennettavan ilmastollisen heilahduksen historiallisia vaikutuksia.

Ilmaston ja historian keskinäisiä suhteita on hedelmällistä tutkia myös yleisemmästä näkökulmasta (Lamb 1982). Ilmasto-olojen määrittämät kasvillisuusvyöhykkeet ovat tietenkin perustana asutushistorialle. Esimerkin modernilta ajalta tarjoaa William Crosby (1986) käsite “Uus-Euroopat”. Sillä Crosby viittaa sellaisiin Euroopan ulkopuolisten mantereiden lauhkeiden ilmastovyöhykkeiden alueisiin, jotka luonnonoloiltaan muistuttavat Eurooppaa ja ovat siten olleet erityisen suotuisia eurooppalaisten kolonisaatiolle. Trooppisten alueiden kolonisoiminen on ollut eurooppalaisille paljon vaikeampaa kuin lauhkeiden. Ratkaisuvia edellytyksiä eurooppalaisen maailmanvalloituksen onnistumiselle olivat myös taito rakentaa valtameripurjehdukseen soveltuvia laivoja sekä maapallon merien säännöllisten tuulten tuntemus. Säännölliset tuulet olivat vielä vuosisata sitten tärkeitä esimerkiksi Australian vehnäpurjehdukselle.

Erityisen haastava tutkimusongelma on säätilan vaihtelun merkitys inhimillisten yhteisöjen toimeentulolle. Vuodenaikaisuus on säätilan vaihtelun keskeinen tyyppi. Sopeutuminen vuodenaikaisuuteen on ollut kaikille inhimillisille kulttuureille välttämättömyys kautta aikojen. Viljelykulttuurien on esimerkiksi pakko säilyttää siemenvil-

ja koskemattomana vaikeidenkin katovuosien yli. Riippuvuuteen sisältyy normatiivinen ulottuvuus, jonka perusta on yhteisöjen välttämättömyys vastustaa niiden vakautta uhkaavia häiriöitä. – Käyttämäni käsite “normatiivisuus” nojautuu Georges Canguilhemin ajatukseen, että taipumus ja kyky vastustaa ulkoa tulevia häiriöitä on elämän yleinen “normatiivinen” ominaisuus (Haila 2000).

Ehkä *harmonia* on hyvä termi kuvaamaan ihmisyyhteisöjen sopeutumisen normatiivista ulottuvuutta. Ihmistointen on oltava harmoniassa ilmaston vaihtelun kanssa; tässä suhteessa meillä ei ole vaihtoehtoja. Harmonia ei ole staattinen olotila vaan päinvastoin, sitä ilmentää monikerroksisten muutos- ja uusiutumissykliä yhtiöosuus. Puutarhurin ja maanviljelijän käytännöt tarjoavat hyvän mallin vuodenaikavaihtelun ja ihmistöiden dynaamiselle harmonialle. Harmonian tekee mahdolliseksi vuodenaikaskierron säännöllisyys. Harmonian ehdot tulevat ilmi silloin, kun syntyy ongelmia. Tästä hyvä esimerkki on tulvasuojelu – tulvien taustana on tietenkin sateisuuden vaihtelu vuodesta toiseen. Pyrkimys hallita tulvia suoraviivaisin teknologisin keinoin patojen ja ruoppausten avulla lisää seuraavien tulvien tuhoisuutta, koska vedet virtaavat betoniränniksi muuttunutta jokiuomaa pitkin alajuoksulle yhtenä hyökyaaltona. Mikko Saikun hieno väitöskirja Mississippi–Yazoo-deltan ekologis-sosiaalisesta historiasta osoittaa havainnollisesti tämän oravanpyörän toimintalogiikan (Saikku 2001).

Harmonia toteutuu maanviljelijän ja puutarhurin toimien vuotuisessa kierrossa. Nykyajan viljelijällä on paljon paremmat mahdollisuudet sopeutua olosuhteiden vuosien väliseen vaihteluun kuin edeltäjillään muutama sata vuotta sitten. Viljelykäytännöt ovat kuitenkin edelleen olennaisesti riippuvaisia vuodenaikojen normaalista kierrosta. Kuluneen talven poikkeukselliset sääolot ovat tuoneet riippuvuuden omalla tavallaan ilmi. Syysviljojen viljely on koetuksella, koska oras palaa pilalle vesisateiden ja pakkaskausiin vaihtelun seurauksena. Poronhoito on jo vuosia kohdannut Lapissa poikkeuksellisista säästä aiheutuvia ongelmia: poroerottelu vaikeutuu syksyisin pakkasten viivästyessä, ja runsaat kevätkauden lumisateet kärjistävät porojen ravintopulaa vaikeimpana aikana kesän kynnyksellä.

* * * * *

Tehkäämme loppuyhteenveto: Kun ilmasto muuttuu, *lämpöä ja kosteutta välittävät kierrot* muuttuvat globaalisti, ja *säätilan vaihtelun tyypit* muuttuvat paikallisesti. Muutokset voivat olla suuria ja nopeita, ja ne ovat yksityiskohdissaan ennustamattomia. Vuotuisen keskilämpötilan kohoaminen ilmentää muutosten todennäköisyyden kasvua, mutta sitä, mitä varsinaisesti tulee tapahtumaan, ei ole mahdollista ennustaa yksityiskohtaisesti keskilämpötilan nojalla. Suomen osalta hyvä osoitus muutoksen epävarmuudesta on se, että lämpenemisen yksi mahdollinen seuraus on Golfvirtaa ylläpitävän “liukuhinnan” siirtyminen etelämmäksi Atlantilla ja siitä seuraava Luoteis-Euroopan ilmaston äkillinen voimakas jäähtyminen. Tämän tapahtumasarjan todennäköisyydestä ei tietenkään voi esittää täsmällistä arviota, mutta termohaliinivirtauksen alkukohdan heilahtelu etelämmäksi ja pohjoisemmaksi on ollut Pohjois-Atlantin ilmasto-systeemin olennainen piirre jo satojen tuhansien vuosien ajan (Clark et al. 2002).

Mikä on ilmaston muutoksen ympäristöpoliittinen olemus? Ongelman tärkein ja periaatteellisin taso on, että ilmastonmuutos osoittaa inhimillisen kulttuurin perustavan riippuvuuden luonnonoloista. Inhimillisen toimeentulon normi on harmoninen yhteiselo luonnon vaihtelun keskeisten rytmien kanssa. Äärimmäiset ilmastonvaihtelut vaikeuttaisivat olennaisesti normin saavuttamista.

Lisäksi ilmastonmuutos antaa perustan spesifimmille päätelmille. Ei ole olemassa “luonnollista” ilmastoa. Ei ole mitään hyödyllistä tapaa erottaa toisistaan ihmistointen aiheuttamat muutokset muista syistä aiheutuvista muutoksista. Muutosten *mekanismit ovat samoja*. Ilmasto muuttuu joka tapauksessa, ja äärimmäisiä sääilmiöitä esiintyy joka tapauksessa. Niiden vaikutukset ovat enimmäkseen haitallisia.

Mikään hyödyllinen ympäristöpoliittinen pohdinta ei siis voi perustua pyrkimykseen erottaa ilmaston “luonnollinen” vaihtelu ihmistointen aiheuttamasta. Päinvastoin, varautuminen luontaisesti ilmenevään vaihteluun on ensimmäinen askel varauduttaessa ihmistointen kärjistämään ilmastonmuutokseen. Ilmastosysteemin toiminta voi muuttua nopeasti ja laaja-alaisesti; jos näin tapahtuu, mitään muuta ei ole tehtävissä kuin sopeutua muutokseen. Yhteisöjen haavoittuvuuden vähentäminen on tässä keskeinen tavoite, jota jokainen katastrofi osaltaan korostaa. Väli-Amerikassa syksyllä 1989 riehunut hurrikaani Mitch toi asian laajemmin julkiseen keskusteluun. Positiivinen esimerkki on, että Pohjois-Amerikassa on saatu olennaisesti vähennetyksi tornadojen tuhoja paremman varoitusjärjestelmän ansiosta. Varoitusten täsmentymisen perustana on tornadojen synnyn dynamiikan paraneva tuntemus (Bluestein 1999).

On mitä tärkeintä käsittää yhteenlaskettujen ihmistointen tuloksena syntyvä geologisen mittakaavan muutosvoima. Asiaa koskeva pohdinta on läpikotaisin normatiivista. Tuhoisien muutosten estämiseksi on kyettävä ryhtymään toimiin, joiden positiiviset vaikutukset eivät tule välittömästi ilmi. Ilmastopolitiikka lepää tässä mielessä normatiivisella perustalla, koska ei ole mitään tapaa arvioida ilmastoa koskevien havaintojen nojalla, onko politiikka ollut onnistunutta vai epäonnistunutta. Sen sijaan on mahdollista arvioida ihmisyyshyönteiden haavoittuvuutta. Hiilidioksidipäästöjen rajoittaminen on tarpeen, mutta ilmastopolitiikan ei tule rajoittua hiilidioksidipolitiikaksi.

Loppujen lopuksi ilmastonmuutoksen edustamat uhkat voivat ehkä johtaa tuotantojärjestelmän järkiperaistymiseen. Rinnasteisesti Bourdieun “järjen ja moraalinen reaali-politiikalle” (Bourdieu 1998, 213) voisi ehkä sanoa, että on pyrittävä luomaan olosuhteet, joissa järjen käyttö ympäristöä koskevissa asioissa on mahdollista. Tuloksena voi olla sellainen tuotantomenetelmien rationalisoituminen, mikä auttaa luonnon uusiutumissykliä ja tuotannollisten uusiutumissykliä välisen harmonian toteutumista.

KIRJALLISUUS

- Alley, Richard B. 2000. *The Two-Mile Time Machine. Ice Cores, Abrupt Climate Change, and Our Future*. Princeton University Press, Princeton.
- Bluestein, Howard B. 1999. *Tornado Alley. Monster Storms of the Great Plains*. Oxford University Press, Oxford.
- Bourdieu, Pierre 1998. *Järjen käytännöllisyys*. Vastapaino, Tampere.
- Clark, Peter U., Nicklas G. Pias, Thomas F. Stocker & Andrew J. Weaver 2002. The role of the thermohaline circulation in abrupt climate change. *Nature* 415: 863-869.
- Crosby, Alfred W. 1986. *Ecological Imperialism. The Biological Expansion of Europe, 900–1900*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Fagan, Brian 2000. *The Little Ice Age. How Climate Made History 1300–1850*. Basic Books, New York.
- Glantz, Michael H. 1996. *Currents of Change. El Niño's Impact on Climate and Society*. Cambridge University Press, Cambridge.
- Haila, Yrjö 2000. Ekologiasta politiikkaan: kurinpitoa vai solidaarisuutta? *Tiede & edistys* 25: 81-96.

-
- Jutikkala, Eino 1987. *Kuolemalla on aina syynsä. Maailman väestöhistorian ääriivivoja*. WSOY, Helsinki.
- Kuusisto, Esko, Lea Kauppi & Pirkko Heikinheimo (toim.) 1996. *Ilmastomuutos ja Suomi*. Yliopistopaino, Helsinki.
- Lamb, H. H. 1982. *Climate, History and the Modern World*. Routledge, London.
- Lorenz, Edward 1993. *The Essence of Chaos*. University of Washington Press, Seattle.
- Rinne, Juhani, Jarmo Koistinen & Elena Saltikoff (toim.) 1998. *Suomalainen sääkirja etanasta El Niñoon*. Otava, Helsinki.
- Saikku, Mikko 2001. *The Evolution of a Place. Patterns of Environmental Change in the Yazoo-Mississippi Delta from the Ice Age to the New Deal*. Renvall Institute Publications 12, University of Helsinki.
- Stevens, William K. 1999. *The Change in the Weather. People, Weather, and the Science of Climate*. Delacorte Press, New York.