

Johdatus ilmastotutkimuksen tieteenfilosofiaan

AKI LEHTINEN

Ilmastotutkimuksen tieteenfilosofia on uusi mutta näkyvä tieteenfilosofian haara. Se käsittelee tieteenfilosofian keskeisiä kysymyksiä käyttäen aineistona ilmastotiedettä ja soveltaen, sikäli kuin mahdollista, tieteenfilosofiassa kehitettyjä teorioita ja käsitteitä ilmastotutkimukseen. Se keskittyy siis arvioimaan ilmastotiedettä tieteenfilosofian käytäntönä. Muutamat alan specialisitit (kuten Wendy Parker, Eric Winsberg, Roman Frigg, Charlotte Wernell) ovat myös erinomaisia yleistieteenfilosofeja. Viime vuosina on ilmestynyt ilmastotieteen kattavan historian¹ lisäksi ensimmäinen kirjamuotoinen johdatus ilmastotieteen filosofiaan.² Katsausartikkeleita on myös julkaistu runsaasti.³

Periaatteessa ilmastotiede on vain yksi sovelletun fysiikan ja kemian haara, mutta perinteisellä fysiikan filosofialla ei ole ollut juurikaan annettavaa ilmastotieteen filosofialle tutkimuskäytännön eroista johtuen. Toistaiseksi filosofisen huomion kohteena ovat olleet ilmastodatan muokkaus ja korjaaminen, simulaatiomallit, robustius (sama tulos saadaan useasta mallista joiden oletukset ovat osittain erilaisia) sekä Duhem–Quine-ongelmat (mallin antaman tuloksen ollessa ristiriidassa havaintoaineiston

kanssa emme voi varmasti tietää, mikä osa suuresta joukosta mallin osasia aiheuttaa ristiriidan).

Tässä luvussa annan yleiskuvauksen niistä ilmastomallinnuksen kysymyksistä, joita erityisesti tieteenfilosofi ovat esittäneet tarkastellessaan ilmastomallien perusrakennetta, tutkimusongelmia ja käytettävissä olevaa dataa. Keskityn ilmastomuutoksen tutkimuksessa käytettyihin globaaleihin yleisen kiertoliikkeen malleihin (*General Circulation Models*, GCM).

Ilmastotutkimuksen perusta

Ilmastolla tarkoitetaan sään tilastollisia ominaisuuksia. Ilmastosysteemin tilaa koskevat pitkän aikavälin keskiarvot laakeaan yleensä 30 vuoden jaksolta. Edes vuoden 2018 heinä- ja toukokuun lämpötilaennätykset Suomessa eivät siis sinänsä vielä kerro ilmastomuutoksesta mitään, koska muutoksesta ilmastossa puhutaan vasta, kun tarkasteluväli on vuosikymmeniä. Ilmastosysteemi käsittää ilmakehän, meret, jäätiköt sekä maanpinnan (maankäyttö, metsät, pellot ynnä muut). Ilmastosysteemin muutosta tutkitaan kuvamallia, miten se reagoi erilaisiin systeemin ulkopuolelta tuleviin tekijöihin, kuten hiilidioksidin määrään, jota ihmiset lisäävät, tai säteilyyn, jota aurinko tuottaa. Näitä muutoksia aiheuttavia tekijöitä kutsutaan ”pakotteiksi” tai ”pakotetekijöiksi” (*forcing factors*). Yleensä käytännön tarpeita varten oletetaan, että ilmastosysteemi on tasapainossa eli että ulkoisten pakotteiden tuottamat kerrannaisvaikutukset eivät enää muuta ilmastoa. Toisaalta viime vuosina on ehdotettu ilmaston määritelmän muuttamista, koska viimeaikaiset lämpötilan muutokset ovat olleet niin nopeita.⁴

Ilmastojärjestelmän osatekijät vaikuttavat toisiinsa erilaisin tavoin, ja tämä on eräs syy siihen, miksi järjestelmä on niin monimutkainen kokonaisuus. Ilmaston tilaa voidaan kuvata norjalaisen Vilhelm Bjerknesin (1862–1951) 1900-luvun alussa esittämällä

seisemällä yhtälöllä. Näisiä fysiikan hyvin tuntemista yhtälöistä (muun muassa Newtonin 2. laki, energian ja massan säilyminen) saadaan keskeiset ilmastoa kuvaavat muuttujat: lämpötila, ilmanpaine, kosteus, tiheys sekä virtaus kolmeen suuntaan. Bjerknesin yhtälöitä ei vain valitettavasti pystytä ratkaisemaan analyttisesti. Tästä syystä tarvitaan tietokonesimulaatiota, joka paloittelee (eli diskretisoi) jatkuva-aikaiset yhtälöt askeliksi, jotka voidaan sitten ratkoa vaihe vaiheelta.

Yhtälöt pitää laskea kullekin ajanjaksolle ja paikalle erikseen. Jokaisessa pisteessä eri puolilla maapalloa on tietty mitattava ominaisuus, kuten lämpötila ja paine. Periaatteessa yhtälöt koskevat kuinka pieniä ilmakehän osia tahansa, mutta käytännössä ilmakehä pitää jakaa laatikoiksi, joiden sisällä ei mallissa enää ole eroja näiden muuttujien suhteen. Nykyisin käytössä olevat mallit jakanvat ilmakehän laajuudeltaan noin 100 kertaa 100 kilometriä oleviin ruutuihin ja 19–95 ”kerrokseen”. Meri kuvataan 20–60 kerroksella. Yhtälöt lasketaan näiden kuutioiden sisällä sekä niiden välillä. Laskutoimituksia on valtavasti ja dataa kertyy teratavuittain. Siten supertietokoneiden laskuteho on edelleen ja tulee aina olemaan ilmastomallien tarkkuutta rajoittava tekijä.

1990-luvun alussa ilmakehamallit pystyttiin yhdistämään meriä koskevaan malliin.⁵ Ilmakehän ja valtameret yhdistävät mallit, jotka kuvaavat lämpöenergian siirtymistä maapallolla (*Atmosphere-Ocean General Circulation Models*, AO-GCM), ottavat huomioon melkein kaikki fysikaalisen ilmastojärjestelmän osat yhtä aikaa. Maapallojärjestelmämalleissa (*Earth System Model*, ESM) otetaan huomioon myös hiilen kiertokulkua, maankäytön muutoksia sekä eräitä muita asioita. Vaikka nämä mallit ovatkin monimutkaisia (niissä voi olla esimerkiksi miljoona riviä ohjelmointikoodia), nekaan eivät edes yritä ottaa kaikkia tekijöitä huomioon. Nämä mallit laskevat ilmaston tilaa pitkälle tulevaisuuteen,

ja ne aloittavat menneisyydestä ottamalla lähtöarvoiksi jollakin hetkellä vallinnutta ilmastoa koskevan datan.

Ilmastoennusteella (*climate prediction*) tarkoitetaan väitettä todellisesta ilmastojärjestelmän muutoksesta tulevaisuudessa, kun otetaan annettuna tieto sen nykyisestä tilasta ja tehdään oletuksia pakotteista. Ilmaston ”projektiio” (*projection*) kuvaa ilmastojärjestelmän reaktioita erilaisiin pakoteskenaarioihin. Yksinkertaisessa, eräänlaiseksi mittatikuksi muodostuneessa skenaariossa tutkitaan mitä tapahtuisi, jos hiilidioksidin määrää kaksinkertaistuisi verrattuna esteelliseen aikaan. Vaikka tämä vertailukohla onkin konventionaalinen, se perustuu karkeaan arvioon siitä, kuinka paljon hiilidioksidia on ilmakehässä joskus tämän vuosisadan loppupuolella (ellei ilmastopolitiikkaan tehdä dramaattisia muutoksia). Yksinkertaisten skenaarioiden lisäksi laaditaan projektiioita, joissa otetaan hiilidioksidin lisäksi huomioon muut kasvihuonekaasut, pienhiukkaset ja maankäytön muutokset. Skenaarioiden laatimiseen tarvitaan yhteiskunnallista tietoa ihmisen todennäköisestä käyttäytymisestä tulevaisuudessa.⁶

Ilmastomallille pitää määrittää rajaehdot sekä muuttujien ja parametrien alkuarvot. Jos vaikka mallia ”ajetaan” lähtien vuodesta 1860 ja jatkaen aina tulevaisuuteen asti, pitää antaa kaikki mallin vaatimat parametrit arvot vuodelle 1860. Tämän jälkeen malli laskee ilmaston tilaa ajassa eteenpäin. Yhden ilmastomallin alkuarvoilla ei ole kovinkaan paljon väliä sen jälkeen, kun malli on edennyt ajassa eteenpäin. Mallin tuottamat numeeriset arvot ovat tietenkin hieman erilaisia, mutta niiden tulokset eivät merkittävästi riipu alkuarvoista. Yleisen kiertoliikkeen malli GCM antaa tietoa siitä, minkälainen ilmasto voisi olla, jos se noudattaisi siihen koodattuja lakeja.

Ilmastodatan ongelmat

Ilmastotiede perustuu valtavaan määrään dataa, joka ei kuitenkaan ole yleensä sellaisenaan käytettävissä ilmastomalleissa. Siksi myös ilmastotutkimuksen filosofiasa data on ollut keskeisessä asemassa. Systemaattisesti kerättyä tilastodataa on vain 1860-luvulta lähtien, ja sinäkin on aukkoja sekä spatiaalisesti että ajallisesti. Datan keskittyminen viime vuosiin on ongelma lähinnä siksi, ettei pelkästään sen avulla voida vielä ratkaista kysymystä, kuinka voimakkaasti ilmasto reagoi ulkoisiin pakotteisiin. Riittävän vanhan ja samalla luotettavan datan puuttuminen vaikeuttaa myös sen arvioimista, miten ilmasto on muuttunut. Datassa on systemaattisia virheitä, jotka pitää korjata. Onneksi joissain tapauksissa korjaaminen on melko helppoa ja sen seurauksena saatavat tulokset luotettavia. Esimerkiksi jos maanpäällinen mittari on sijainnut samassa paikassa vaikkapa sata vuotta ja sinä aikana sen ympärille on kasvanut miljoonakaupunki, tiedämme mittarin näyttävän asteen tai kaksi lämpimämpää lämpötilaa, koska kaupunki lämmittää ilmaa tuon verran. Satelliittien antamaa dataa pitää myös aika ajoin kalibroida uudelleen, sillä niiden lentoradat muuttuvat.

Ilmastodatan muokkaamiseen ja täydentämiseen kuluu kuitenkin valtavasti aikaa ja resursseja. Datan keräämiseen, puhdistamiseen, täydentämiseen, korjaamiseen, jatkuva-ajakaistamiseen ja tasoitamiseen (*smoothing*) tarvitaan kokonaisia tutkimusryhmiä. Ilmastotieteilijät ovat omaksuneet erityisiä termejä kuvaamaan näitä prosesseja. *Uudelleenanalyysillä* (*reanalysis*) tarkoitetaan korjattua, täydennettyä ja jatkuva-ajakaistettua datajoukkoa, jolla korvataan alkuperäinen vajavainen ja vääristynyt empiirinen data. Se antaa parhaan arvion ilmastojärjestelmän tilasta menneisyydessä, kun otetaan huomioon havaintojen lisäksi mallien tuottama tieto ilmastojärjestelmän fysiikasta. Ilmastomalleja käytetään siis myös parhaan mahdollisen datan konstruointiin. Termillää

data assimilation kutsutaan tilastollisia menetelmiä, joiden avulla empiirinen data sovitaan yhteen ilmastomallin kanssa.⁷ Ennen tietokonesimulaatioiden käyttöönottoa aukkoja täytettiin esimerkiksi niin sanotulla spatiaalisella interpolatiolla: jos vaikkapa lämpötiladataa on olemassa Saharan keskeltä yhdestä pisteestä ja muutamasta pisteestä sen reunamilla, täytetään kaikki vaaditut kohdat näiden keskiarvoilla.

Ilmastodataa kerätään monesta erilaisesta lähteestä, ja se koskee monia eri asioita. *Paleodataa* saadaan yleensä erilaisista korvikemuuttujista (*proxy*): puiden vuosirenkaat, jääporaukset, mutasedimentit ja vastaavat muuttujat antavat ainakin jotakin tietoa ennen vuotta 1860 vallinneesta ilmastosta. Lämpötiladataa saadaan maanpäällisistä mitareista, laivoista, poijuista (merivesi), säähavaintopalloista (*radiosonde*) ja 1990-luvulta alkaen satelliiteista.

Uudelleenanalyysi etenee seuraavasti. Jos ilmastomallilla laitetaan laskemaan ilmaston tilaa aloittamalla aineistolla, jossa on empiiristä dataa sellaisena kuin se on kerätty sekä tavalla tai toisella aukot täyttävää keinodataa, se ei anna mielekkäitä tuloksia, koska kerätyssä datassa on virheiden lisäksi epäuskottavia hyppäyksiä. Näitä hyppäyksiä voi syntyä esimerkiksi silloin, kun vanha mittausinstrumentti vaihdetaan uuteen. Ne täytyy tasoitaa (*smooth*), koska muutoin malli ei tasapainotu eikä siis käytäyty mielekkäästi. Näistä syistä mallia pitää ajaa eteenpäin ajassa siten, että seuraavan ajanjakson muuttujien arvot sopivat hyppäyksettä malliin. Kun on päästy johonkin haluttuun ajanjaksoon, historiallinen ja keinodata kannattaa korvata mallin itsensä antamalla arvoilla. Nyt otetaan lähötkohdaksi periodi *t* ja katsotaan, mikä muuttujien arvojen joukko periodilla *t-1* olisi paras kompromissi data-arvoiksi suhteessa korjattuun dataan periodeilla *t-1* ja *t*. Periodin *t-1* dataksi valitaan siis ne arvot, jotka parhaiten ennustavat mallin antamia periodin *t* arvoja. Tätä prosessia jatketaan periodi kerallaan taaksepäin, kunnes päästään alkuarvoihin.⁸ Alkuperäinen

empiirinen data sekä aukot täyttänyt keinodata korvataan siis simuloidulla datalla. Ilmastotieteilijät kutsuvat näin tuotettua muutettua datajoukkoa uudelleenanalyysiksi sen takia, että data-assimilaatiossa tavallaan arvioidaan empiirinen data uudelleen sen perusteella, minkälaisia tuloksia malli sekä uudempi data vaativat.

Kuten tieteenhistorioitsija Paul N. Edwards toteaa, uudelleenanalyysia käytettiin ensin vain alkuarvojen määrittämiseen, kunnes pian huomattiin, että se tuottaa selvästi parempia retroduktioita (eli ennusteita koskien aikaa, joka on mallissa tulvava-suudessa mutta meille jo historiaa) kuin korjattu ja tasoitettu empiirinen data.⁹ Tästä syystä empiirisen datan aukot täytetään nykyään ilmastosimulaatiomallin itsensä tuottamalla arvoilla. Toisin sanoen nyt mallin kalibrointi aloitetaan alun perinkin uudelleenanalyysidatalla, ja näin ollen ilmastomallit käyttävät näistä malleista itsestään generoitua dataa.

On ilmeistä, että tämän käytännön voidaan sanoa rikkovan tieteenfilosofassa runsaasti huomiota saanutta datan käytön uutuusperiaatetta (*use novelty*) vastaan: samaa dataa käytetään ensin mallin rakentamiseen ja sitten sen empiiriseen arvioimiseen, jolloin samaa dataa käytetään kahteen kertaan (*double counting*).¹⁰ Ei ole silti itsestään selvää, että uudelleenanalyysi on esimerkiksi episteemisesti epäilyttäväästä tavasta käyttää dataa kahteen kertaan.¹¹ Uudelleenanalyysia käytetään, koska se todistettusti tuottaa parempia arvioita ilmakehän tilasta menneinä ajankohdina kuin puhdas empiirinen korjattu data.¹² Lisäksi vaikka simulaatio tuottaa datan, sen tuottama data on merkittävästi parempaa kuin vaikkapa interpolaatiolla tuotettu data, koska ilmastomalli mahdollistaa fysilkan lakien käyttämisen datan aukkojen täyttämiseen. Ei ole siksi ainakaan kovin ilmeistä, että simulaation tuottama data uudelleenanalyysille on vähemmän luotettavaa kuin puhtaasti empiirinen data.¹³

Ilmastomuutoksen havaitseminen ja kohdentaminen

Ilmastomuutoksen tutkimuksessa erotetaan yleensä toisistaan ilmastomuutoksen havaitseminen (*detection*) ja sen kohdentaminen (*attribution*).¹⁴ Ilmasto muuttuu osittain itsestään satunnaisesti (*internal variability*), esimerkiksi el Niño- ja la Niña-ilmiöiden kautta. Sisäsyntyisten syiden lisäksi siihen vaikuttavat erilaiset ulkoiset seikat (*external forcing*), joista tärkeimmät ovat auringon säteilyn ja maan kierron muutokset, tulivuoren purkaukset (jotka yleensä viilentävät ilmastoja muutaman vuoden ajan) sekä hiilidioksidin ja muiden kasvihuonekaasujen (erityisesti vesihöyry, metaani) määrän muutokset. Kasvihuonekaasut lämmittävät ilmastoa, aerosolit yleensä viilentävät.¹⁵ Sisäisen ja ulkoisen välillä eroa on joskus vaikea tehdä. Esimerkiksi maan käytön muutokset voivat olla seurausta ilmastomuutoksesta ja toisaalta vaikuttavat siihen.

Ilmastomuutoksen havaitsemisessa olennainen kysymys on: mistä tiedämme, ettei havaittu noin yhden celsiusasteen keskimääräinen lämpötilan muutos ole seurausta vain sisäisestä satunnaisuutoksesta? Jos se olisi, voisi ajatella, että muutos voi yhtä hyvin seuraavaksi olla kohti kylmempää ilmastoa. Tätä kysymystä tutkittaessa pyritään yleensä määrittämään niin sanottu ilmaston herkkyys (*sensitivity*) tasapainossa eli se, kuinka paljon ilmaston reagoi muutoksiin ulkoisissa seikoissa. Tavallisesti kiinnostuksen kohteena on luonnollisesti se, kuinka paljon lämpötila nousee hiilidioksidin määrän kasvaessa. Useimpien aineistojen sekä ilmastomallien perusteella sen arvioidaan olevan noin 3 astetta hiilidioksidin määrän kaksinkertaistuksessa,¹⁶ mutta osa paleodatasta (puun vuosirenkaat) asettaa herkkyyden noin kahteen asteeseen.

Herkkyys arviointia hankaloittaa se, että koska sisäisissä muutoksissa on kyse satunnaisprosesseista, niiden mittakaavaa on vaikea arvioida. Paleodata antaa tästä asiasta tietoa, mutta koska

aineisto on syntynyt sekä ulkoisten pakotteiden että sisäisen vaihtelun yhteisvaikutuksesta, se ei anna suoraa arviota esimerkiksi maapallon keskilämpötilan vaihtelusta. Lisäksi paleoaineistoa on tyypillisesti saatavissa vain rajoitetuilta alueilta ja sen tulkinta on monimutkaista. Näin ollen vaikka el Niño – Tynnen valtameren alueen ilmanpaineen heilahtelua – voidaankin jonkin verran empiirisesti tutkia ja mitata, keskeisin arvio sisäisen muutoksen mittakaavasta saadaan olennaisesti ilmastomallista itsestään.¹⁷

Ilmastomuutoksen *kohdentamisessa* keskeinen kysymys on: mistä tiedämme, ettei havaittu lämpötilan muutos ole seurausta muutoksesta luonnollisissa tekijöissä, kuten auringon säteilyssä? Hiilidioksidin määrän lisäyksen tiedetään olevan seurausta ihmisen toiminnasta. Kohdentamiskysymys koskeekin vain sitä, onko havaittu lämpötilan muutos osoitettavissa hiilidioksidin lisäyksen ansioksi muiden mahdollisten syiden sijaan. Olen törmännyt ilmastotieteen filosofiassa yhteen artikkeliin, jossa kyseenalaiseen hiilidioksidin lisäyksen ja ilmaston lämpenemisen yhteys. Tässä artikkelissa tieteenfilosofi Joel Katrav esittää, ettei väite hiilidioksidin keskeisestä osuudesta ole läpäissyt ”tiukkaa testiä” (*severe test*). Hypoteesi läpäisee tiukan testin jos voimme osoittaa, että olisi epätodennäköistä, että empiirinen evidenssimme on sellaista kuin se nyt on, jos hypoteesi olisi epätosi. Katravin mukaan sisäisen muutoksen keskeistä osuutta ilmastomuutoksessa ei voida sulkea pois. Siksi on mahdollista, että ilmastomallit tuottavat nykyiset tulokset siitä huolimatta, että hypoteesi hiilidioksidin keskeisestä osuudesta on epätosi.¹⁸ Emme siis voi Katravin mukaan pitää epätodennäköisenä sitä, että saisimme nyt saadut tulokset, jos tuo hypoteesi olisi epätosi. Hiilidioksidin keskeinen osuus ei siis hänen mukaansa ole läpäissyt tiukkaa testiä, koska meidän pitäisi voida sanoa, että tuo hypoteesi olisi ollut tulla falsifioituksi (osoitetuksi epätodeksi), mutta näin ei ole tapahtunut.¹⁹

Viime kädessä tämä on pääosin empiirinen kysymys, koska meidän pitää tietää, mikä on erilaisten kausaalisuureiden suhteellinen osuus jossakin ilmiössä. Tällaiseen ”Kuinka paljon?” -kysymyksen pystyvät parhaiten vastaamaan ilmastotieteilijät itse. Voin filosofina silti todeta, että jos Katrav tosiaan haluaa haastaa väitteen hiilidioksidin keskeisestä osuudesta, hän ei voi pitää koko ilmastotiedettä ja erityisesti ilmastosiimulaatiomalleja kovin kaan luotettavina. Tämä johtuu siitä, että ilmastomallintajat ajavat myös niin sanottuja kontrollisimulaatioita, joissa malli on muutoin sama mutta hiilidioksidin historiassa tapahtunut lisäys on kontrafaktuaalisesti poistettu kokonaan.²⁰ Näillä kontrolliajoilla ei pystytä tuottamaan aikasarjoja, jotka muistuttaisivat toteutunutta ilmastomuutosta: ilmasto ei yksinkertaisesti lämpene näissä kontrolliajoissa käytännössä ollenkaan. Näin ollen Katravin väite takooitaa sitä, että hänen täytyy pitää ilmastomalleja systemaattisesti harhaanjohtavina. Kontrolliajon ja normaalin hiilidioksidilisäyksellä varustetun simulaation tuottama ero on kuitenkin olemassa. Katrav tuskin haluaa yrittääkään selittää tätä eroa sisäisellä muutoksella, vaan hän ennemminkin kyseenalaistaa koko mallien luotettavuuden.

Kohdentamisongelmaa on tutkittu myös niin sanotuilla sormenjälkitutkimuksilla.²¹ Niissä perusidea on se, että erilaiset ulkoiset tekijät tuottavat ilmastosiimulaatiomallien mukaan erilaisia lämpötilan muutoksen ”sormenjälkiä”: erilaiset ulkoiset tekijät muuttavat ja ovat muuttaneet ilmastoa epätasaisesti eri paikoissa ja eri aikoina. Auringon säteilyn muutos puolestaan muuttaa lämpötiloja tasaisesti koko maapallolla, joten sormenjälkitutkimusten perusteella epätasaista muutoksen aiheuttajaa ei voi kohdentaa ainoastaan säteilyyn. Mallien mukaan auringon säteilyn muutokset ja hiilidioksidin aiheuttama lämpötilojen muutos eivät jakaudu tasaisesti koko maapallolle, vaan esimerkiksi pohjoiset napa-alueet lämpiävät muita alueita enemmän. Tämä johtuu

muun muassa siitä, että lumen sulassa maa heijastaa pienemmän osuuden auringon säteilystä takaisin avaruuteen, ja siitä, että merivirrat kuljettavat lämpöä paikasta toiseen. Toisaalta pienhiukkasten jäähdyttävä vaikutus on suurin runsasväkisillä alueille. Myös ajallista vaihtelua esiintyy. Auringonpilkkuhavaintojen perusteella auringon säteily ei ole kasvanut 1960-luvun jälkeen, kun taas kasvihuonekaasut ovat lisääntyneet nopeasti.

Tutkijoilla on yksimielisyys ilmastonmuutoksen perusmekanismista, joka on ollut tiedossa jo yli vuosisadan ja joka on melko helposti ymmärrettävissä. Auringon säteily tuottaa lämpöä maapallolle. Osa tästä säteilystä heijastuu takaisin avaruuteen eikä jää lämmittämään maata. Kasvihuonekaasut ilmakehässä päästävät ensin lyhyemmän aallonpituuden aallot lävitseen kohiti maata mutta pitävät osan ilmakehän ja maapinnan lähettämästä pidemmän aallonpituuden säteilyä ilmakehässä. Ilman ilmakehää maapallon keskilämpö olisi noin -18 celsiusastetta, kun nyt se on noin +15 astetta. Tämän mekanismin tunteminen selittää sen, miksi ilmaston lämpeneminen pystyttiin ennustamaan jo ennen sen alkamista. Epävarmuus koskee lähinnä sitä, miten erilaiset itseään vahvistavat prosessit muuttavat lämpötilan noustessa. Esimerkiksi lämpiämisen myötä maasta vapautuu metaania, joka taas lisää kasvihuoneilmiötä; lumipeitteen poistussa musta maa heijastaa heikommin säteilyä takaisin avaruuteen; lämpimämpi ilma nostattaa maasta enemmän kosteutta, mikä lisää vesihöyryä, joka taas on voimakkaampi kasvihuonekaasu kuin hiilidioksidi, ja niin edelleen. Vaikka tiedämmekin monien tällaisten mekanismien olemassaolosta, emme useinkaan vielä tiedä, kuinka merkittäviä ne ovat määrällisesti.

Duhem–Quine-ongelmia ja niiden ratkaisuja

Tarkastellaan seuraavaksi Duhem–Quine-ongelmia ilmastonmallinnuksessa. Duhem–Quine-ongelma tarkoittaa sitä, että jos jokin mallin antama tulos ei ole sopusoinnussa havaintoaineiston kanssa, emme voi varmasti tietää, mikä osa suuresta joukosta mallin osasia aiheuttaa tällaisen ristiriidan. Tieteellisistä hypoteeseista ei voida johtaa havaintoja koskevia tuloksia ilman apuleuksia. Tästä syystä Duhem–Quine-teesin mukaan hypoteeseja ei voi testata irrallaan muusta mallista. Ilmastomallit ovat monimutkaisia, ja siksi on vaikea tietää, mitä osaa pitää korjata, jos niiden tekemä ennuste menee pieleen.²² Tarkastellaan ensin paljon palstatilaa saanutta tapautta, jossa oikeasti ilmastoa tutkivilla ilmastokeptikoilla (näitäkin on, vaikka suurin osa skeptikoina esiintyvistä onkin diletantteja) näytti olevan pitävää evidenssiä sen puolesta, että ilmastomallit ovat väärässä ja että ilmasto ei lämpene.²³ Ilmastomallien mukaan tropiikissa ilmakehän ylempien kerrosten pitäisi lämmetä enemmän kuin maan pinnan, mutta satelliittidata kääntöpiirien välistä osoitti, että ylempi ilmakehä ei ollut lämmennyt lainkaan tai se oli jopa jäähtynyt. Skeptikoiden mukaan maan pinnalla tehdyissä mittauksissa täytyy olla vikaa (esimerkiksi koska kaupungistuminen nostaa mittarien osoittamaa lämpötilaa), koska he olivat myös todentaneet, että satelliittidata on yhteensopivaa sääilmapalloodatan kanssa.²⁴

Fyysikko David Douglass ja muut skeptikot toimivat Alabamassa sijaitsevassa tutkimuskeskuksessa, joka keskittyy ilmastodatan tuottamiseen erityisesti satelliitteista. Duhem–Quine-ongelma oli tässä se, ettemme tieneet, mihin voisimme luottaa: malleihin, maanpäälliseen dataan vai satelliittidataan. Ilmastotutkijat lähtivät selvittämään, miksi Alabaman tutkijat väittivät, että satelliittidata on ristiriidassa ilmastomallien ja maanpäällisen datan kanssa. Ilmastotutkija Benjamin Santer kumppaneineen

huomasi useammankin kiinnostavan asian.²⁵ Ensimmäkin osoitautui, että Douglassin tutkimusryhmä oli käyttänyt säilmapalldataa oman datansa kalibroimiseen. Tämä voi sinänsä olla metodologisesti hyväksyttävissä, mutta jos näin on tehnyt, ei voi enää väittää, että yhteensovitus näiden kahden datajoukon (säilmapallo- ja satelliittidatan) välillä antaa riippumatonta tukea satelliittidatalle. Lisäksi säilmapalldataan käyttäminen ilmaston tutkimiseen on jonkin verran ongelmallista: näitä ilmapalloja on käytetty ensisijaisesti sään ennustamiseen, mutta niiden käyttämistä pidempiaikaisten ilmiöiden tutkimiseen ei pidetä perustelluna, koska ilmapallojen teknologia ja lämpötilojen mittaamisen tapa ovat muuttuneet aikojen kuluessa.

Toiseksi skeptikoiden menetelmistä löytyi varsin ilmeisiä virheitä. Estimattorilla tarkoitetaan tilastotieteessä sääntöä tai menetelmää, joka tuottaa datan perusteella jollekin parametrille arvon (estimaatin), joka kuvaa tuon parametrin arvoa todellisuudessa. Heidän käyttämänsä estimattori olettaa lämpötilan tennä olevan vakio. He osoittivat simuloinnalla satelliittien tuottamaa dataa, että tämä estimattori osoittaa eroa GCM:n ja satelliittidatan välillä silloinkin, kun tuo ero tiedetään itse simulaatiolla satunnaisesti tuotetuksi. Toiseksi heidän datansa indikoi erilaisia tuloksia kuin muiden tutkimuskeskusten. Aiemmin Alabaman lisäksi oli vain yksi toinen tutkimuskeskus, joka tuotti satelliittien antamista mitausarvoista dataa. Sittenmin keskukset on tullut lisää ja on huomattu, että Alabaman data poikkeaa kaikkien muiden keskusten datasta. On vaikea sanoa tarkasti, mistä kaikesta ero syntyy, koska datan prosessoinnissa ja muokkaamisessa käytetään valtavaa määrää erilaisia oletuksia.

Jotkin tutkijat eivät enää suostu käyttämään Alabaman dataa lainkaan, koska he eivät yksinkertaisesti luota siihen, että se on muokattu luotettavalla tavalla. Tämä saattaa johtua myös kunasta, koska yksi Douglassin ja hänen työtovereidensa artikkelin

kirjoittajista (ilmastotieteilijä John Christy) todisti Yhdysvaltain kongressissa vielä vuonna 2015, ettei ilmastomuutosta ole todennettu luotettavasti, vaikka heidän tätä asiaa koskeva tutkimuksensa oli osoitettu virheelliseksi. Santer kumppaneineen päätyi lopputulokseen, että ilmakehän lämpötilan muutos ei korjausten jälkeenkään ole täysin yhteensojiva mallien kanssa, mutta ero on sen verran pieni, ettei sen perusteella voi oikeastaan enää epäillä ilmastomuutosta.²⁶ Ilmastotieteilijä Gilbert Compo tutkimusryhmineen mittäsi maanpäällisen datan epäsuorasti muun muassa merivesi- ja ilmapainedatasta, ja tulokset olivat yhteensojivia maanpäällisen datan kanssa.²⁷ Tämä tulos antoi vahvistuksen sille, että maanpäällinen data ei sitenkään ollut harhaanjohtavaa. Compon väite kuten myös alabamalaisten argumentti satelliittidatan yhteensojivuudesta nojaa ilmiselvästi niin sanottuun *kokeelliseen robustuuteen*: jos kaksi erilaista tapaa mitata samaa asiaa antavat saman tuloksen, tämä oikeutetusti vahvistaa luottamusta siihen, että mitatut arvot ovat todenmukaisia.

Mallijoukot ja robustuus

Robustiuudella tarkoitetaan yleensä sitä, että annettu tulos saavutetaan useilla erilaisilla tavoilla. Ilmastotieteen filosofiassa on puhuttu runsaasti myös mallirobustiuudesta (*derivational robustness*).²⁸ Mallirobustiuudessa toistensa kanssa osittain samantlaiset mallit antavat samantlaisia tuloksia. Tämä robustiuden laji on erityisen tärkeä ilmastotieteen filosofiassa, koska ilmastotieteessä on jo pitkään tutkittu niin sanottuja mallijoukkoja (*model ensembles*). Tällä hetkellä maailmassa kehitetään noin kolmeakymmentä globaalia ilmastomallia, jotka perustuvat pääosin samaan perusfysiikkaan mutta eroavat toisistaan sen suhteen, kuinka yksityiskohtaisesti mikäkin prosessi on mallissa kuvattu ja minkälaisista ilmakehän "laatikon" kokoa mallissa käytetään. Mallijoukoista

puhutaan silloin, kun näiden mallien tuottamat tulokset kootaan yhteen ja verrataan tuloksia toisiinsa sekä empiiriseen dataan.²⁹ Tutkiat ovat siis kiinnostuneita sekä siitä, tuottavatko mallit robusteja tuloksia, että siitä, kuinka hyvin ne ovat pystyneet ennustamaan ilmastomuutosta tähän asti. Näitä malleja käytetään luonnollisesti myös ennusteiden tekemiseen tulevaisuudesta, ja näitä ennusteita verrataan myös toisiinsa. Mallijoukkoja käytetään myös robustuudesta riippumattomasta syystä: niiden keskiarvot ennustavat suurimman osan muuttujista paremmin kuin mikään yksittäinen malli.

Motivaatio tutkia mallijoukkoja tulee siitä, että ilmastomallit tekevät valtavan määrän erilaisia idealisoivia oletuksia. Näitä oletuksia tehdään monenlaisista syistä. Osa erityisesti kemiallisista prosesseista ilmakehässä on edelleen niin huonosti tunnettuja, ettei niitä ole kunnolla vielä ylipäättään mallinnettu. Tämän tyyppisiä asioita on tosin muitakin, esimerkiksiä mainittakoon vaikkapa maankäytön muutosten vaikutus ilmastoon ja merten kylky sitoa energiaa. Lisäksi ilmastomalleissa on erityisongelmia, joita ei tapaa kaikilla tieteenaloilla. Keskeinen ongelma on se, että koska laitkon koko on pienimmilläänkin noin 100 kertaa 100 kilometriä, yksittäisiä pilviä ei voi mallintaa näissä globaaleissa malleissa. Pilviä pitää siis esittää tavallaan keskiarvoina. Näitä kutsutaan yleensä *parametrisoinneiksi*.³⁰ Nämä ovat ongelmallisia siksi, että erilaiset pilvet heijastavat säteilyä eri tavoin. Koska parametrisoin-teja ei tehdä mitaamalla eikä myöskään johtamalla fyysikan teoriasta, ne määritetään usein kokeilemalla, minkälaiset parametrien arvot tuottavat kokonaisuudessaan parhaan yhteensopivuuden mallin ja datan välille. Näille prosesseille on annettu myös vähemmän mairittelevia nimityksiä, kuten ”tuunaus” (*tuning*).³¹ Vaikka tutkiat tietäisivätkin, miten pilviä voitaisiin mallintaa todenmukaisemmin, globaaleissa malleissa näin ei voi tehdä, koska laskuteho ei yksinkertaisesti riitä.

Monet filosofit puolustavat väitettä, että mallirobustius konfirmoi ilmastomallien tuloksia.³² He yleensä nojaavat sellaiseen käsitykseen mallirobustuudesta, jonka mukaan mallien mahdollisesti tekemillä päätöksillä oletuksilla ilmastosta ei ole merkitystä mallien antamien tulosten johtamiseen, jos kukin malli tekee hieman erilaisia idealisatioita tuottaen kuitenkin saman tuloksen. Robustius tavallaan neutralisoi epätotuutta malleissa, koska se osoittaa, ettei ainakaan joitakin päätöksiä oletuksia tarvita tulosten johtamisessa.

Kriittisemmin robustiuden episteemiseen relevanssiin suhtautuvat filosofit tavallisesti vetoavat siihen, ettei robustiuden osoittaminen kuitenkaan poista epätösiä oletuksia malleista. Näin ollen robustiikin tulos voi edelleen olla epätösi. Robustiuden merkitystä tutkiessa kannattaa tämän takia pitää mielessä niin katsutusta konfirmaatioteoriasta tuttu jako absoluuttiseen ja lisäykselliseen (*incremental*) konfirmaatioon. Edellisellä tarkoitetaan sitä, että on saavutettu jokin korkea konfirmaation taso, esimerkiksi että väite on suurella todennäköisyydellä (yli 50 %) tösi. Konfirmaation lisäys puolestaan tarkoittaa vain sitä, että robustiuden ansiosta väite saa lisää tukea, mutta ei ole takeita siitä, että se on todennäköisesti tösi. Tästä syystä kriittiset kannanotot³³ eivät sittenkään ole ristiriidassa positiivisempien kanssa, ne vain puhuvat eri asiasta.

Selitän vielä lyhyesti, miten oma ehdotukseni robustien mallien konfirmaatiosta antaa samalla tavan ratkaista Duhem–Quine-ongelmia³⁴ kertomalla, miten konfirmaatiota kohdennetaan mallien osille. Tarkastellaan idealisoitua kuvausta kolmesta mallijoukon mallista M_1 , M_2 ja M_3 . Esitetään kussakin mallissa tapah-tuva hiilidioksidin lisäys symbolilla C . Kukin malli sisältää erilaisia idealisatioita $A_1, A_2, \dots$ koskien muun muassa pilvien mallintamista, maan säteilyn heijastumista, jääpeitettä ynnä muita. Näiden lisäksi vältämme ainoastaan siitä, mitkä ovat mallien antamat tulokset (T) ja niitä vastaava empiirinen data (E). Olkoon

T_H toteutunutta globaalia keskilämpötilaa koskeva tulos ja E_H sitä vastaava data, jonka oletamme olevan sopusoinnussa T_H :n kanssa (ohjeisessa kuviossa pystysuora viiva näiden välillä kuvaa tätä). T_T on mallin tekemä ennuste tulevaisuuden lämpötilasta. Mallia ajetaan siis ensin historiassa, mutta sitten sen ajanista jatketaan myös tulevaisuuteen. T_2 ja T_3 koskevat joitain muita ilmasto- ja liittyviä muuttujia, joista on olemassa dataa, vaikkapa ilmapainetta ja syyskuun jääpeitettä Arktiksella.

Mallia M_1 voidaan nyt kuvata vaikka näin:

$$M_1 = (C \& A_1 \& A_2 \& A_3) \vdash T_H, T_T$$

$$\begin{array}{ccccccc} \diamond T & \diamond T & \diamond T & | & & & \\ T_T & T_T & T_T & T_T & E_H & & \end{array}$$

Symboli $\vdash$ tarkoittaa, että malli tuotti tulokset T_H ja T_T . Symboli $\diamond T$ kunkin mallin M_i oletuksen alapuolella tarkoittaa, ettemme voi ainakaan vielä sulkea pois sitä, että kyseinen oletus voi olla välttämättömän tuloksen T_T johtamiseksi. Seuraavaksi otamme mukaan mallit M_2 ja M_3 sekä niistä saadut ilmapainetta ja jääpeitettä koskevat tulokset:

$$M_2 = (C \& A_1 \& A_2 \& A_3) \vdash T_H, M_2 = (C \& A_2 \& A_4 \& A_5) \vdash T_T, M_3 = (C \& A_1 \& A_6 \& A_7) \vdash T_3$$

$$\begin{array}{ccccccc} \diamond T & \diamond T & \diamond T & | & & & \\ T_T & T_T & T_T & T_T & E_H & E_2 & E_3 \end{array}$$

Tässä vaiheessa tulosta T_T ei vielä ole johdettu malleista 2 ja 3. Jos mallista M_2 saadaan sama tulevaisuuden lämpötilaa koskeva tulos kuin mallista M_1 , voimme esittää tätä näin:

$$M_2 = (C \& A_1 \& A_2 \& A_3) \vdash T_H, M_2 = (C \& A_2 \& A_4 \& A_5) \vdash T_T, M_3 = (C \& A_1 \& A_6 \& A_7) \vdash T_3$$

$$\begin{array}{ccccccc} +T & +T & | & +T & +T & | & \\ T_T & T_T & E_H & T_T & T_T & E_2 & E_3 \end{array}$$

Koska C sekä A_2 ovat osana malleja 1 ja 2, voimme todeta, että on aiempaa uskottavampaa, että juuri näitä oletuksia tarvitaan

tuloksen T_T johtamiseen. Sitä vastoin oletuksia A_1, A_3, A_4 , ja A_5 ei selvästikään tarvita tuloksen T_T johtamiseen, ja siksi niiden alla oleva tila on jätetty tyhjäksi. Jos vielä mallista M_3 saadaan sama tulos T_T , voidaan tilanne esittää näin:

$$M_2 = (C \& A_1 \& A_2 \& A_3) \vdash T_H, M_2 = (C \& A_2 \& A_4 \& A_5) \vdash T_T, M_3 = (C \& A_1 \& A_6 \& A_7) \vdash T_3$$

$$\begin{array}{ccccccc} +T & | & +T & | & +T & | & \\ T_T & E_H & T_T & E_2 & T_T & E_3 & \end{array}$$

Tuloksen T_T robustuus siis vahvistaa päätelmää, että tulevaisuuden lämpötila riippuu keskeisesti nimenomaan hiilidioksidin lisäyksestä eikä jostain muusta tekijästä. Tämä johtuu siitä, että robustuus sulkee muita mahdollisuuksia (eli $A_1, \dots$) pois. Robustus tarkoittaa tässä siis sitä, että mallit tuottavat suurin piirtein saman tuloksen. Nyt tulevaisuutta koskeva tulos T_T konfirmoituu epäsuorasti. Epäsuora konfirmaatio tarkoittaa, että empiirinen evidenssi tukee jotakin sellaista osaa mallista tai sen tulosta, josta ei voida johtaa tuota evidenssiä. Esimerkissämme E_2 ja E_3 konfirmoivat tulosta T_T epäsuorasti. Näin ei voi kuitenkaan tapahtua, ellei T_T ole robusti tulos. On huomionarvoista, että apulotukset ovat erilaisia kaikissa malleissa. Tämä on tärkeää, koska niiden erilaisuus yhdessä tuloksen T_T robustuuden kanssa osoittaa, ettei mikään niistä ole välttämättömän tulevaisuutta koskevalle lämpötila-ennusteelle. Sitä vastoin hiilidioksidin lisäys on aina mukana T_T :n johtamisessa. Edellä mainitsemani kontrollijojen keskeinen tulos voitaisiin esittää vaikka näin:

$$M_2 = (C \& A_1 \& A_2 \& A_3) \vdash T_T$$

$$M_2 = (A_1 \& A_2 \& A_3) \not\vdash T_T$$

Soveltamalla englantilaistilfosofi John Stuart Millin muotoilemaa erovaiksuuksien periaatetta voidaan päätellä, että C aiheuttaa T_T :n. Toisin sanoen, koska toteutunutta lämpötilan nousua ei voida tuottaa mallissa, josta hiilidioksidin lisäys on poistettu,

tulosten robustius yhdessä kontrolliajojen tulosten kanssa viittaa siihen, että nimenomaan hiilidioksidi on aiheuttanut toteutuneen lämpötilan nousun ja että se tulee tekemään niin myös tulevaisuudessa. Antamani kuvaus mallien robustiudesta on tietysti karkea yksinkertaistus, eivätkä mallien tulokset ole koskaan täysin identtisiä. Tarkoitukseni onkin vain kuvata robustiuden ja kontrolliajojen merkitys, ottaen annettuna, että mallit ovat riittävän robusteja.

Kontekstin vaikutus keskusteluun

Vaikka ilmastotieteen filosofia on periaatteessa samalla tavalla hie-
man irrallaan kuulummista poliittisista väittelyistä kuin muukin
tieteenfilosofia, sitä lukiessa kannattaa tarkkaan katsoa, minkälai-
sella foorumilla kirjoitus on julkaistu. Eurooppalaiset ja yhdysval-
talaiset asiantuntijat toimivat täysin erilaisessa ympäristössä, mikä
heijastuu myös kirjoitusten erilaisuutena.³⁵ Jälkimmäiset joutuvat
taistelemaan ympäristössä, jossa poliittinen valta ei ole vielä
edes kunnolla tunnustanut ilmastonmuutosta, ja tästä syystä he
joutuvat vakuuttelemaan vastustajiaan. Tällöin filosofi joutuvat
pitämään oikeastaan kaikkea mahdollista kritiikkiä ilmastomal-
leja kohtaan lähestulkoon epäeettisenä. Eurooppalaiset pystyvät
vapaammin esittämään myös kriittisiä huomioita ilmastotieteestä
– se on kuitenkin tieteenfilosofian keskeisimpiä tehtäviä tieteen-
alasta riippumatta. Toisaalta monet hyvinkin kriittisiä arvioita
esittäneet filosofi (kuten Roman Frigg ja Wendy Parker) ovat
henkilökohtaisissa tapamisissa sekä hieman yleisajaisemmissa
kirjoituksissaan kertoneet pitävänsä toteutunutta ilmastonmuu-
tosta ja ihmisen roolia sen synnyssä päivänselvänä tosiasioina.³⁶

4

Tekniikan filosofia ja kysymys elämänuodosta

ILKKA NIINILUOTO

Ihmisen kehittämät tekniset laitteet ja järjestelmät ovat paljon
esillä, kun puhutaan ilmastonmuutoksen syistä ja torjumisesta.
Osa toivoo uusista ja puhtaammista teknologioista ilmasto-
ongelman ratkaisua. Toisille suurisuuntaiset mutta ennen koke-
mattomat teknologiset ratkaisut energian- ja ruoantuotannossa,
tai jopa ilmaston muokkaamisessa, tuovat mukanaan vain riskejä
uusista ongelmista. Vastakkaiset näkökulmat ovat tuttuja aiem-
mista teknologisista murroksista, mutta ilmastonmuutoksen koh-
dalla kysymys laajenee yksittäisistä tekniikoista koskemaan koko
tekniikkariippuvaisista ja kulutuskeskeistä elämänuotoamme.

Tekniikan filosofiassa tarkastellaan artefakteja, jotka välineinä
antavat ihmiselle uusia mahdollisuuksia ja kykyjä, positiivista toi-
minnalista vapautta ja valtaa. Tekniset välineet eivät ole neutraaleja
kulttuuriesineitä, vaan tekniikka on läpikotaisin arvosidonnaista,
sillä jokaisella välineellä on aina jokin aiottu käyttötarkoitus, mutta
haittoina on lisäksi otettava huomioon välineen tuottamisen kus-
tannukset ja käytön ei-aiotut sivu- ja etäisvaikutukset.

Tekniikan arviointi (*Technology Assessment*, TA) voidaan
perustaa seurauseettiseen käsittekehikoon $TA = 6E + S$, jossa ovat
mukana efektiivisyys, ekonomisuus, ergonomisuus, esteettisyys,