

*Ilmastonmuutoksesta käytävä keskustelu on usein värikästä. Tohtori Jouni Räisänen esitti joulukuussa tieteiden talolla Helsingissä keskustelun tueksi tietopakettin ilmastonmuutokseen liittyvistä perusasioista.*

# ILMASTONMUUTOS ON TÄÄLLÄ



**M**AAPALLON ILMASTO on aina vaihdellut, ja joskus pitkien ajanjaksojen kuluessa tapahtuneet vaihtelut ovat olleet hyvinkin suuria. Esimerkiksi viime jääkauden kylmimpään aikaan n. 20 000 vuotta sitten vettä oli sitoutunut mannerjäätiköihin niin paljon, että valtameren pinta oli noin 120 metriä nykyistä alempana. Suomenkin päällä jäätä oli parhaimmillaan kahden kilometrin kerros.

Luonnollisten ilmastovaihteluiden taustalla ovat monet eri aikaskaaloissa vaikuttavat mekanismit. Pitkäkestoisia muutoksia ovat aiheuttaneet esimerkiksi mannerlaattojen liike (106-108 v.) sekä vaihtelut maan kiertoradassa ja akselin kallistuskulmassa (104-105 v.). Näistä jälkimmäistä pidetään perussyynä kylmien jääkausien ja nykyisenkaltaisten interglasiaalijaksojen vuorotteluun viimeisten vuosimiljoonien aikana.

Lyhyempiä, vuosista vuosisatoihin kestäviä ilmastovaihteluita ovat aiheuttaneet mm. vaihtelut auringon aktiivisuudessa ja suurten tulivuorenpurkausten yleisyydessä. Ilmastossa esiintyy myös merivirtoihin ja ilmavirtauksiin liittyvää epäsäännöllistä vaihtelua, usein ilman mitään varsinaista ulkoista syytä. Vuodet eivät siksi ole veljeksiä, eivät aina vuosikymmenenkään.

Viime aikoina myös ihmistoimet ovat alkaneet vaikuttaa ilmastoon. Vaikutusmekanismeista eniten on herättänyt huolta ilmakehän kasvihuonekaasujen lisääntyminen. Nykyisten arvioiden mukaan kasvihuoneilmaston voimistuminen lämmittää maapallon ilmastoa kuluvaan vuosisadan aikana niin paljon, että se peittoaa kirkkaasti alleen ilmaston luonnollisen vaihtelun vaikutukset.

## LUONNOLLINEN KASVIHUONEILMIÖ

**MAAPALLON ILMAKEHÄ** läpäisee auringonsäteilyä varsin hyvin. Maanpinnan säteilemä pidempi-aaltoinen lämpösäteily sen sijaan imeytyy suurelta osin ilmakehään, eikä siis pääse suoraan avaruuteen. Tämä lämpösäteilyn imeytymisestä aiheutuva ”kasvihuoneilmiö” pitää maapallon pinnan yli 30 astetta lämpimämpänä kuin se muuten olisi.

Teoreettisesti voidaan laskea, että maapallon keskimääräinen pintalämpötila olisi ilman kasvihuoneilmaston vaikutusta noin  $-18^{\circ}\text{C}$ , kun se todellisuudessa on noin  $+14^{\circ}\text{C}$ .

Kasvihuoneilmiö aiheutuu lämpösäteilyä imevistä kasvihuonekaasuista, joista tärkein on vesihöyry ja toiseksi tärkein hiilidioksidi. Muita kasvihuonekaasuja ovat esimerkiksi otsoni, metaani ja ilokaasu.

## KASVIHUONEILMIÖN VOIMISTUMINEN

**IHMISKUNNAN TOIMIEN VAIKUTUKSESTA** kasvihuoneilmiö on nyt nopeasti voimistumassa. Tärkein syy tähän ovat hiilidioksidipäästöt, joista yli 85% tulee fossiilisten polttoaineiden kuten kivihiiilen, öljyn ja maakaasun käytöstä. Ennen teollistumisen alkua, 1700-luvun puolivälissä, hiilidioksidin pitoisuus ilmakehässä oli noin 280 miljoonasosaa (parts per million = ppm) mutta vuonna 2012 jo 392 ppm. Viime aikoina pitoisuus on kasvanut noin 2 ppm vuodessa.

Etelämantereelta tehtyjen jääkairauksen perusteella tiedetään, että hiilidioksidipitoisuus on jo nykyisin korkeampi kuin kertaakaan viimeisten 800 000 vuoden aikana. Useita kymmeniä tai satoja miljoonia vuosia sitten hiilidioksidia lienee kuitenkin ajoittain ollut ilmakehässä jopa moninkertaisesti nykyistä enemmän. Myös maapallon ilmasto oli tuolloin selvästi nykyistä lämpimämpi.

Ihmistoiminta on kasvattanut myös mm. metaanin, ilokaasun ja alilmakehän otsonin pitoisuuksia. Myös ilmakehän vesihöyryn määrä on kasvamassa. Ihmiskunnan suora vaikutus veden kiertokulkuun on häviävän pieni, mutta ilman lämmitessä siihen mahtuu vesihöyryä entistä enemmän. Vesihöyryn lisääntyminen on siis esimerkki ilmastomuutoksia voimistavasta palauteilmioista.

Kasvihuonekaasujen ohella on lisääntynyt myös erilaisen ilmassa leijuvien pienhiukkasten määrä. Pienhiukkaset ovat ominaisuuksiltaan kirjaavaa joukkoa, ja myös niiden vaikutukset ilmastoon ovat moninaiset. Nettovaikutus on kuitenkin jäädyttävä: toisaalta monet hiukkaset heijastavat itse tehokkaasti auringonsäteilyä avaruuteen, toisaalta ne saavat pilvet heijastamaan auringonsäteilyä pois entistä tehokkaammin.

Maapallon keskimääräinen pintalämpötila on noussut 1900-luvun alun jälkeen  $0,7-0,8^{\circ}\text{C}$ . Suuri osa lämpenemistä on ollut nykyisen, mallitulosten ja havaintojen keskinäiseen vertailuun perustuvan käsityksen mukaan juuri kasvihuoneilmaston voimistumisen aiheuttamaa. Todennäköisesti lämpötila olisi noussut maapallolla jopa havaittua enemmän, elleivät pienhiukkasten päästöt olisi kumonnet osaa kasvihuonekaasujen lisääntymisen lämmitysvaikutuksesta.

## TULEVIEN ILMASTONMUUTOSTEN ENNUSTAMINEN

**ARVIOT TULEVISTA ILMASTONMUUTOKSISTA** perustuvat ilmastomallilaskelmiin. Ilmastomalli on tietokoneohjelma, joka kuvaa ilmastojärjestelmässä (ilmakehät, valtameret ja niiden jääpeite, maa-alusta) vaikuttavia prosesseja fysiikan peruslakien pohjalta. Mikään malli ei tietenkään pysty kuvaamaan kaikkia luonnossa vaikuttavia ilmiöitä, joten laskelmissa on väistämättä epätarkkuutta.

Yleinen väärinkäsitys on, että ilmastomalliennusteet perustuisivat havaittujen ilmastomuutosten ekstrapolointiin. Tällaista syöttötietoa malli ei kuitenkaan tarvitse. Sen sijaan tarvitaan arvio ilmastoon vaikuttavista ulkoisista tekijöistä, kuten kasvihuonekaasujen ja pienhiukkasten päästöistä tai pitoisuuksista ajan funktiona.

Koska päästöjä ei voida mitenkään ennustaa luotetavasti esimerkiksi sadan vuoden päähän, tehdään useita vaihtoehtoisia oletuksiin perustuvia skenaarioita. Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli (IPCC) käytti vuoden 2007 raportissaan kuutta eri päästöskenaariota. Niiden kaikkien mukaan ainakin hiilidioksidin päästöt kasvavat vielä lähivuosikymmeninä, väestönkasvun ja talouskasvun lisätessä fossiililla polttoaineilla tuotetun energian tarvetta. Vuosisadan loppua kohti skenaariot erkaantuvat: osa niistä ennakoii päästöjen alenemista, toiset edelleen jatkuvaa kasvua.



Ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden kasvu taittuu vasta, kun päästöt putoavat murto-osaan nykyisestä. Mainituista kuudesta skenaariosta optimistisinkin nos-taisi hiilidioksidin pitoisuuden vuoteen 2100 mennen-sä lähes 550 miljoonasosaan eli miltei kaksinkertaiseksi 1700-luvun luonnolliseen tasoon verrattuna.

Ilmastomallit ovat läheistä sukua päivittäisessä säänen-nustuksessa käytettäville laskentamalleille. Ennusteiden tulkinta on kuitenkin erilainen. Vaikka ilmastomallin tu-lostiedoista periaatteessa pystyykin lukemaan esimerkik-si lämpötilan Etelä-Suomessa jouluna 2062, ei sääolojen päivittäisiä tai edes vuosivälisiä vaihteluita tietenkään voida ennustaa vuosikymmenten päähän. Kun mallin tu-loksista otetaan useamman vuosikymmenen keskiarvo, suurin osa satunnaisesta vaihtelusta tasoittuu kuitenkin pois. Näin päästään käsiksi ilmasto-olojen muutoksiin.

## MITEN ILMASTON ENNUSTETAAN MUUTTUVAN?

**MALLIT ENNUSTAVAT** maapallon keskilämpötilan nouse-van tällä vuosisadalla yhdestä kuuteen astetta – riippuen toisaalta siitä, kuinka suuriksi ihmiskunnan kasvihuone-

kaasupäästöt muodostuvat ja toisaalta siitä, kuinka voi-makkaasti ilmasto kasvihuonekaasujen lisääntymiseen reagoi. Kaikkiaan mantereet lämpenevät meriä nopeam-min, ja esimerkiksi Pohjois-Euroopassa lämpeneminen näyttäisi olevan noin 1,5-kertainen koko maapallon kes-kiarvoon verrattuna. Vieläkin nopeampaa lämpenemistä on odotettavissa Pohjoisella jäämerellä sen jääpeitteen vä-hetessä ja ohetessa.

Sademäärien ennustetaan kasvavan korkeilla leveys-asteilla, erityisesti talvisaikaan, samoin kuin monin pai-koin trooppiikissa. Toisaalta monet nykyiselläänkin kuivat subtrooppiset alueet, esimerkiksi Välimeren seutu, käyvät entistä vähäsateisemmiksi. Jatkossakin sadeolot kuitenkin vaihtelevat suuresti vuodesta toiseen. Sademäärien muutos ei siksi erotu ilmaston luonnollisen vaihtelun seasta yhtä nopeasti ja selvästi kuin lämpötilojen nousu.

Keskiarvojen muuttuessa myös ilmastolliset ääri-ilmi-öt muuttuvat. Kovat helteet yleistyvät, paukkupakkaset vähenevät. Sateiden intensiteetti kasvaa: sadetta saadaan enemmän kerralla, mutta toisaalta monin paikoin entistä harvemmin. Trooppisten pyörremyrskyjen pelätään voi-mistuvan pahimmillaan nykyistäkin hurjemmiksi, vaika myrskyjen esiintymisalueessa ei ilmeisesti tapahdukaan suurta muutosta.

Eri ilmastomallien tulokset vaihtelevat. Yksi Eurooppaa koskevien ennusteiden epävarmuuksista on Pohjois-Atlantin merivirtojen käyttäytyminen. Lähes kaikissa malleissa Atlantin lämpimät merivirrat heikkenevät, joissakin jopa niin paljon, että ilmasto Islannin tietämällä jäähtyy kasvihuonekaasujen lisääntymisestä huolimatta. Euroopan mantereelle asti jäähtyminen tuskin kuitenkaan ulottuu.

## MERENPINNAN NOUSU

**ILMASTON LÄMMETESSÄ** myös merivesi lämpenee ja lämmitessään laajenee. Lisäksi merten vesimassa kasvaa maa-alueiden jäätiköiden sulaessa. Molemmat tekijät nostavat merenpintaa. Viimeksi kuluneiden 100 vuoden aikana merenpinnan arvioidaan nousseen maapallolla keskimäärin 12-22 cm. Alkaneella vuosisadalla merenpinta nousee enemmän, mutta ennusteet nousun suuruudesta ovat epävarmoja.

Hallitustenvälinen ilmastomuutospaneeli päätyi v. 2007 raportissaan 20-60 cm:n muutokseen vuoteen 2100 mennessä. Sittemmin on kuitenkin esitetty myös arvioita, joiden mukaan valtamerten vesi voisi pahimmassa tapauksessa nousta samana aikana lähes kaksi metriä. Joka tapauksessa merenpinnan nousu tulee jatkumaan vielä pitkään vuoden 2100 jälkeenkin, jopa siinä tapauksessa, että ilmaston lämpeneminen saataisiin pysäytettyä.

Suomi on tässäkin asiassa onnekaassa asemassa, sillä Itämeren rannikoilla maankohoaminen kumoaa ainakin osan merenpinnan nousun vaikutuksesta.

## ILMASTOMUUTOKSEN VAIKUTUKSET

**MAAPALLON HISTORIASTA** tunnetaan monia paljon nykyistä lämpimämpiä ilmastojaksoja. Niistäkin elämä on selvinnyt, mutta rajut ilmastomuutokset näyttävät olleen ainakin osatekijänä monissa sukupuuttoaloissa. Onkin esitetty arvioita, että jo muutaman asteen lämpeneminen saattaisi kymmeniä prosentteja nyt elävistä eliölajeista sukupuuton vaaraan.

Ihmiskunta on tottunut suunnilleen nykyisenkaltaisiin ilmasto-oloihin, ja esimerkiksi väestönteheyden jakauma on muovautunut paljolti ravinnontuotannon edellytysten sanelemana. Siksi suuret ilmastomuutokset mihin tahansa suuntaan tuottavat enemmän haittaa kuin hyötyä. Kovimmilla ovat kehitysmaat – osaksi heikompien sopeutumismahdollisuuksien takia, osaksi ilmastollisista syistä: sijaitseehan niistä valtaosa alueilla, jotka ovat jo nykyisin viljakasvien ja ihmisen hyvinvoinnin kannalta vähintään riittävän lämpimiä. Maatalousvaltaisissa kehitysmaissa myös kuivuuskausien ja rankkasateiden lisääntyminen tuottaa suurempia ongelmia kuin teollisuusmaissa.

Ilmastomuutos ei ole ihmiskunnan ainoa ongelma, mutta se pahentaa monien muiden ongelmien vaikutuksia. Miten ratkoa väestönkasvun, suurten ihmisjoukkojen köyhyyden ja luonnonvarojen liiakäytön tuomat ongelmat, kun samanaikaisesti pitäisi sopeutua myös muuttuvan ilmaston asettamiin vaatimuksiin?

## MITEN ILMASTON LÄMPENEMISTÄ VOITAISIN HILLITÄ?

**PÄÄSY MENEILLÄÄN OLEVAAN** ilmaston lämpenemiseen on ilmakehän hiilidioksidin lisääntyminen. Hiilidioksidin päästöistä taas valtaosa syntyy fossiilisten polttoaineiden käytöstä. Lämpenemisen pysäyttäminen, tai edes sen hidastaminen, vaatii siis nykyistä tehokkaampaa energiankäyttöä ja/tai laajamittaista ei-fossiiliseen energiaan siirtymistä. Haaste on valtava, sillä fossiiliset polttoaineet tyydyttävät nykyisin yli 80% ihmiskunnan energiantarpeesta.

Yksi kiertotie on voimalaitoksissa syntyvän hiilidioksidin talteenotto, mutta senkin laajamittainen toteuttaminen lienee vielä kaukana tulevaisuudessa. Myös uusien metsien istuttaminen poistaa hiilidioksidia ilmakehästä. Metsitettäväksi kelpaavaa vapaata maa-alaa on kuitenkin rajallisesti.

Ilmaston lämpenemisessä on hiilidioksidin lisäksi osallisena muitakin kasvihuonekaasuja, tärkeimpänä metaani. Myös auringonvalo tehokkaasti imevillä nokihukkassilla on ilmastoa lämmittävä vaikutus, vaikka pienhiukkasten vaikutus kaiken kaikkiaan onkin päinvastainen.

Sekä metaani että etenkin noki ovat ilmakehässä paljon hiilidioksidia lyhytikäisempiä, joten niiden päästöjen vähentäminen vaikuttaisi ilmastoon nopeammin. Lisäksi metaani- ja nokipäästöjen karsiminen luultavasti onnistuisi hiilidioksidipäästöjen vähentämistä halvemmalla. Pitkän tähtäimen ilmastomuutosongelmaa metaani- ja nokipäästöjen vähentäminen ei kuitenkaan ratkaise, ellei samalla leikata tuntuvasti myös hiilidioksidin päästöjä.

## VIIVE

**MONET ASIAT ILMASTOJÄRJESTELMÄSSÄ** tapahtuvat pitkällä viiveellä. Hiilidioksidipäästöjen tasaantuminen nykytasolle ei suinkaan riittäisi pysäyttämään pitoisuuden kasvua, vaan tämä vaatisi päästöjen alentamista pieneen (joskin summittaisesti tunnettuun) murtoosaan nykyisestä.

Senkin jälkeen, kun kasvihuonekaasujen lisääntyminen ilmakehässä olisi lakannut, lämpeneminen jatkuisi etenkin merialueilla, vaikka toki aiempaa hitaampana. Meriveden lämpölaajeneminen ja mannerjäätiköiden sulaminen puolestaan jatkuisivat satoja tai jopa tuhansia vuosia senkin jälkeen, kun lämpeneminen ilmakehässä on tasaantunut.

On siis syytä olettaa, että ihmisen aikaansaama kasvihuoneilmiön voimistuminen vaikuttaa ilmastoon ja muihin luonnonoloihin maapallolla vielä hyvin pitkään. Sen, kuinka suureksi tämä vaikutus muodostuu, määräävät pitkälti lähivuosina ja -vuosikymmeninä kansainvälisessä politiikassa ja talouselämässä tehtävät ratkaisut.

---

*Kirjoittaja on tohtori Helsingin yliopiston fysiikan laitoksella.*

*Katso ja kuuntele luento kokonaisuudessaan: [youtube.com/skepsisfinland](https://www.youtube.com/skepsisfinland)*