JÄÄKAUDEN JÄLKEISET ILMASTON MUUTOKSET JA NIIDEN SYYT PUIDEN KERTOMINA

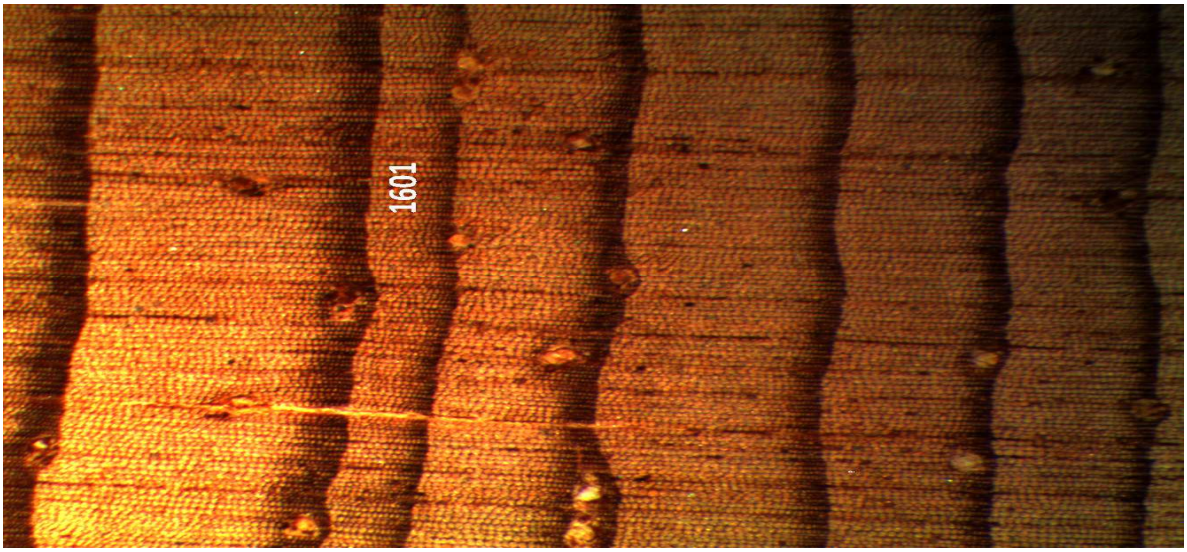
Kari Mielikäinen
Kasvu- ja tuotostutkimuksen professori
Metsäntutkimuslaitos
Vantaan toimintayksikkö

Ingressi:

Maapallon ilmaston päätekijät ovat auringon lämpöenergia, lämmön säilyminen maassa ja ilmakehässä, sekä sen siirtyminen paikasta toiseen. Ihmiskulttuurien nousut ja tuhot ovat usein liittyneet ilmaston muutoksiin. Lämpökausien aikana kulttuurit kukoistavat, kylminä ja kuivina ajanjaksoina kuollaan sotiin, nälkään ja tauteihin. Etelässä pahinta jälkeä tekevät kuivakaudet, erityisesti monsuunisateiden viivästyminen tai kokonaan poisjäänti. Tärkein tieto ilmaston muutoksiin sopeutumisessa ovat paikallisilmastot - eivät maapallon keskiarvot. Paikallisten muutosten ymmärtämisen viisastenkivi löytyy menneisyydestä.

Puut keräävät ilmastotietoa

Puut keräävät ja tallentavat kasvaessaan ympäristötietoa, joka säilyy järvien pohjamutiin ja soihin hautautuneissa puunrungoissa vuosituhansia. Muinaiset lämpö- ja kuivakaudet, luonnontuhot, tulivuoren purkaukset, jokien virtaamat ja puiden välinen kilpailu ovat jättäneet pysyvät merkkinsä vuosirenkaisiin eli vuosilustoihin.

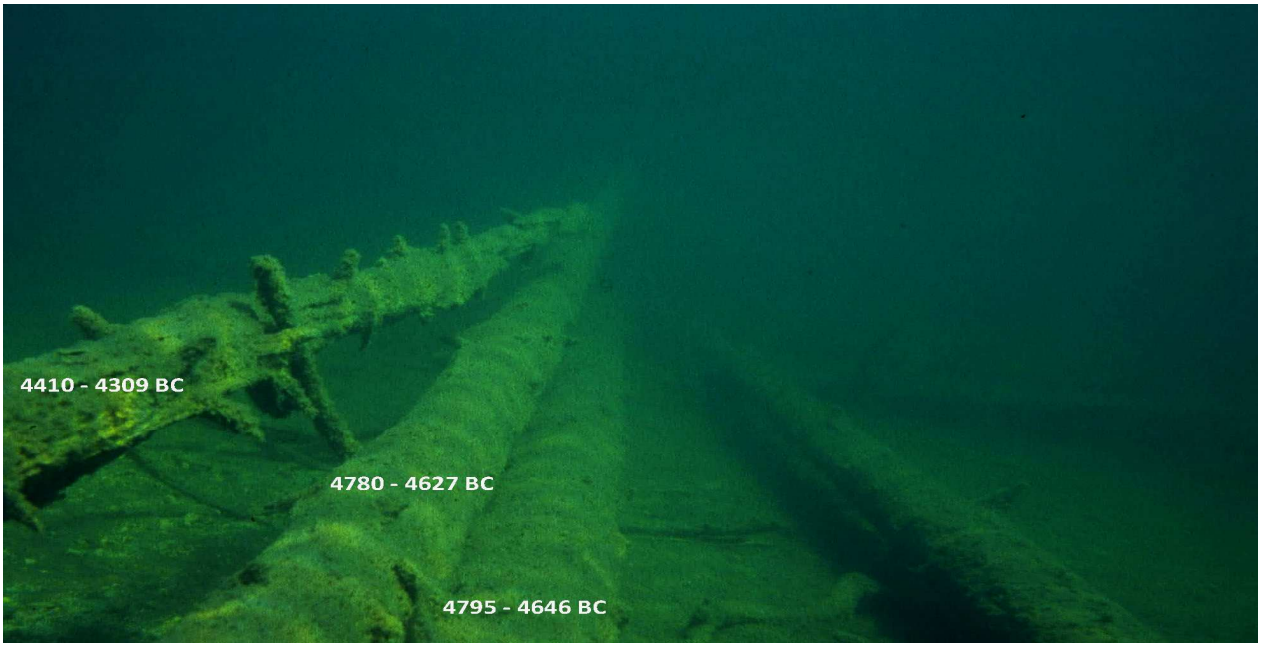


Kuva 1. Perussa vuonna 1600 purkautuneen Huaynaputina -tulivuoren aiheuttamasta kylmyydestä kielivä sormenjälki Lapin männyssä.

Ympäristönmuutoksia etsitään ja analysoidaan vuosilustojen leveydestä, puuaineen tiheydestä ja solurakenteesta sekä hiilen, hapen ja vedyn isotoopeista. Lustotiedon vertaaminen merten pohjasedimenteistä, soista ja jääkairauksista saatavaan muuhun proksitietoon parantaa puulustojen käyttökelpoisuutta menneiden lämpötilojen ja sateiden, sekä meri- ja ilmavirtojen ja auringon aktiivisuuden vaikutusten arvioimisessa niin kesällä kuin talvellakin.

Suomen Lapista on professori Matti Erosen 1970-luvulla aloittaman työn tuloksena koostettu 7640 vuoden mittainen, vuodentarkka männyn lustokronologia. Maailman pisimpiin lukeutuva aikasarja ulottuu lähes viimeisimpään jääkauteen. Se on luotu liittämällä elävien puiden, kelojen, kantojen, rakennushirsien ja lampien pohjamudista nostettujen megafossiilien lustonäytteet toisiinsa. Näytteiden yhdistäminen yhdeksi kronologiaksi perustuu osittain samanaikaisesti eläneiden puiden poikkeuksellisiin yhteisiin kasvuvuosiin. Kylmien kesien kapeat vuosirenkaat näkyvät yleensä kaikissa saman alueen puissa.

Vuosilustojen käyttö menneen ilmaston ennustamisessa perustuu lustotiedon ja mitattujen ilmastomuuttujien (lämpötila ja sademäärä) välisten riippuvuuksien mallinnukseen. Mallinnuksessa käytettävät säätilastot ulottuvat meillä kattavasti 1880 -luvulle. Pohjoisessa hallitseva ilmastosignaali on kasvukauden lämpötila; etelän puulustot kertovat sade- ja kuivakausista.



Kuva 2 a. Vuosituhansien aikana Lapin lampien pohjamutiin hautautuneet männyn megafossiilit kätkevät sisäänsä jääkauden jälkeisen ilmastohistorian. Nämä Enontekiön Pöyrisjärvessä lepäävät männyt kertovat 6000 vuoden takaisesta lämpökaudesta.



Kuva 2 b. Enontekiön Pöyrisjärvellä humisivat 6000 vuotta sitten tukkimänniköt. Tutkija Mauri Timonen esittelee järvestä löytynyttä megafossiilia kaukana nykyisen metsänrajan pohjoispuolella.

Jääkauden jälkeiset ilmastonmuutokset

Noin 10 000 vuotta sitten päättyneen Jääkauden jälkeen mänty ja koivu levisivät nopeasti koko Suomeen. Mäntymegafossiilien löytöpaikat nykyisen metsärajan pohjoispuolella osoittavat Lapin olleen noin 6000 vuotta sitten kauttaaltaan metsien peitossa. Kesien arvioidaan olleen tuolloin noin 2,6 astetta nykyistä lämpimämpiä (Kultti ym. 2006). Lähihistoriamme tunnetuin ilmastonmuutos on ollut tuhannen vuoden takainen Keskiajan lämpökausi. Kolmatta sataa vuotta kestäneen ajanjakson suotuisuus sai grönlantilaiset ja islantilaiset viljelemään maata ja kasvattamaan karjaa. Englantilaiset tuottivat samaan aikaan viiniä, oululaiset ja kainuulaiset vehnää. Lämpökausi päättyi 1300-luvulla pikku jääkautena tunnettuun kylmään ajanjaksoon. Islanti ja Grönlanti autioituivat, mustasurma tappoi miljoonia ihmisiä ympäri Eurooppaa, ja toistuvat katovuodet vähensivät useaan otteeseen Suomen väkilukua.

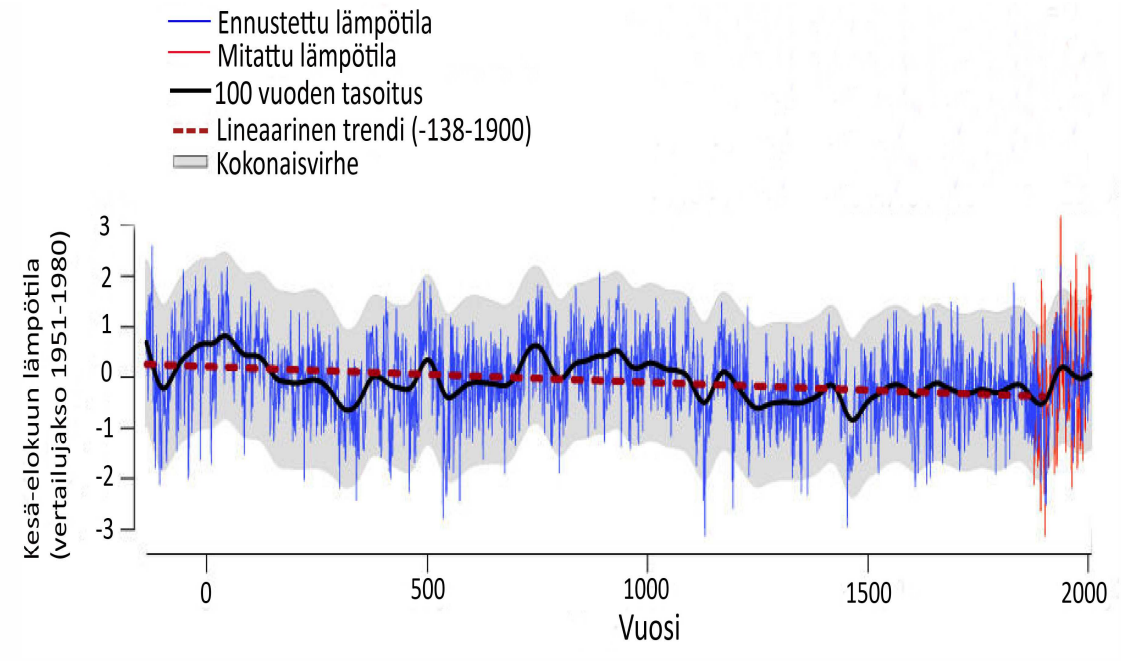
Suomessa pikku jääkausi päättyi vasta 1900-luvun alussa. Ilmasto lämpeni voimakkaasti 1940-luvulle, minkä jälkeen se alkoi jällen viiletä. Lapin metsien uudistaminen joutui 1960-luvulla pahoihin vaikeuksiin kylmien kesien ja karuun ilmastoon sopimattomien puualkuperien vuoksi. Viimeiset 30 vuotta ilmastomme on aluksi lämmennyt ja 2000-luvulla tasaantunut ilman selkeää trendiä. Lapin männyn vuosilustokronologiasta löytyy runsaasti tietoa menneiden ilmastonmuutosten voimakkuudesta, kestosta ja syistä, jos vain osaamme sitä oikein tulkita.

Ilmaston muutosten globaalit syyt

Auringon aktiivisuus vaihtelee jaksollisesti aikajänteiden ulottuessa muutamista vuosista vuosituhansiin. Auringonpilkkuina mitattavan vaihtelun vaikutukset näkyvät monin tavoin luonnossa. Tunnetuimmat vaihtelusyklit ovat pituudeltaan 11, 80, 205 ja 220 vuotta. Näistä toiseksi lyhin eli 80 vuoden Gleissbergin sykli on usein liitetty ilmaston keskipitkän ajan muutoksiin.

Auringon vaikutus maahan riippuu myös maapallosta itsestään. Jugoslavialainen tiedemies Milankovitch havaitsi vuonna 1930 maapallon akselikulman vaihtelevan 41 000 vuoden jaksoissa välillä 22 - 24 astetta. Kallistuksen muutokset aiheuttavat eteläiselle ja pohjoiselle pallonpuoliskolle kohdistuvan säteilyn pitkän ajan vaihtelua. Tämä yhdessä maapallon kiertoradan soikeuden ja maan akselin vipattamisen kanssa aiheuttaa ilmastoon pitkän ajan jaksollisuutta. Viimeiset 800 000 vuotta maapalloa on hallinnut kiertoradan soikeudesta aiheutuva sykli, joka näkyy säännöllisinä lämpöjaksoina pidempien kylmäkausien välillä.

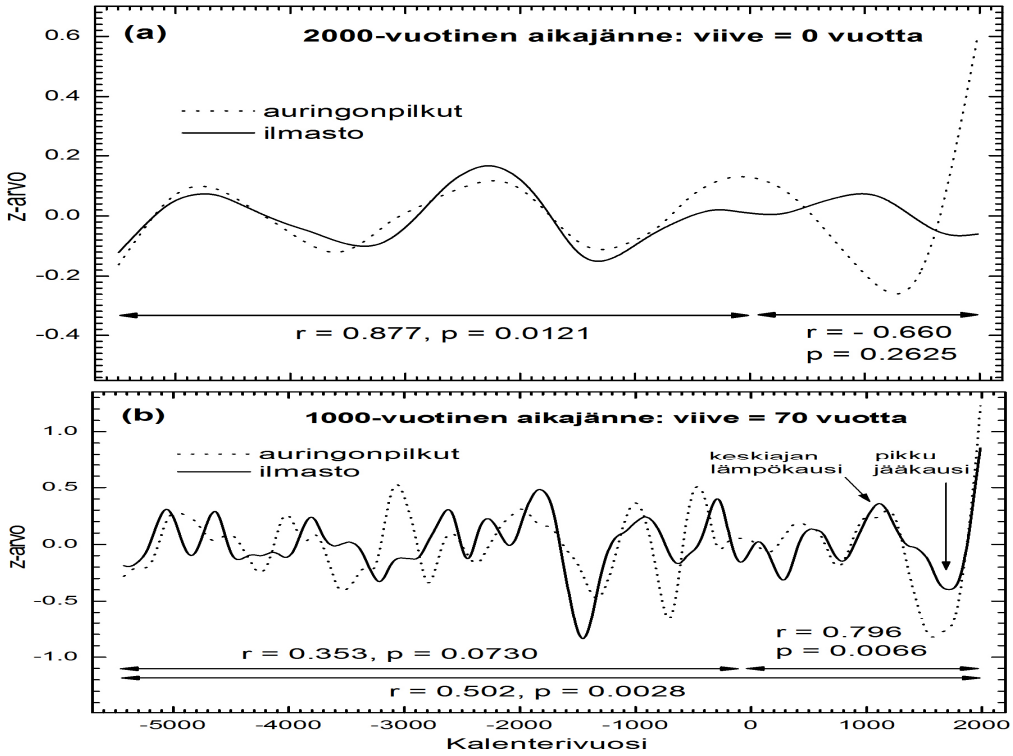
Tällä hetkellä maapallon akselikulman muutos kääntää pohjoista pallonpuoliskoa auringosta poispäin. Kuvassa 3 on esitetty puulustoihin perustuva arvio maan akselin kallistuskulman vaikutuksesta pohjoisen pallonpuoliskon ilmastoon viimeisten kahden vuosituhannen ajalta. Noin 0,6 asteen viilenemisen ohella silmiinpistävää on vuosien ja vuosisatojen välinen vaihtelu. Puutiedon mukaan Lapin ilmasto on ollut lämpimintä ajanjaksomme ensimmäisellä vuosisadalla ja toisen kerran noin vuoden 1000 paikkeilla.



Kuva 3. Fennoskandian puulustoihin perustuva kasvukauden (kesä, heinä, elo) lämpötilarekonstruktio paljastaa lämpö- ja kylmäkausien ohella maapallon kallistuskulman muutoksesta johtuvan viilenemisen 2000 vuoden ajalta (Esper ym. 2012). Myös 1900-luvun alkupuoliskon lämpöpiikki näkyy selvänä puulustoissa.

Tutkimustieto auringon vaikutuksista ilmastoon on vajavainen ja osin kiistanalainen. Auringon suora säteily ei joidenkin tutkijoiden mielestä voi selittää maapallon ilmaston viimeaikaista lämpenemistä - varsinkaan, kun auringon ennätyksellisen korkea aktiivisuus on tasaantunut jo muutama vuosikymmen sitten ja kääntynyt jopa laskuun. Viimeisimmät tutkimukset viittaavat kuitenkin siihen, että auringolla on suoran säteilyn ohella toistaiseksi huonosti tunnettuja vaikutusmekanismeja yläilmakehään, pilvien muodostukseen ja tätä kautta myös ilmastoon.

Uusi läpimurto suomalaisessa lustotutkimuksessa tapahtui vajaa vuosikymmen sitten. Se perustui menetelmään, jolla pystyttiin arvioimaan auringon aktiivisuuden vaihtelut puulustojen hiili-isotoopeista vuodentarkasti yli 10 000 vuoden takaa (Solanki 2004). Tutkimus paljasti auringon aktiivisuuden olleen 1900-luvulla korkeimmillaan kahdeksaan tuhanteen vuoteen. Aurinkopilkkujen liittäminen Lapin mäntykronologian pohjalta laskettuihin lämpötiloihin teki ensi kertaa mahdolliseksi tutkia auringon aktiivisuuden vaikutusta Fennoskandian ilmastoon vuosituhansien mittakaavassa vuoden tarkkuudella.



Kuva 4. Puulustoista arvioidun Auringon aktiivisuuden ja Lapin kesien lämpimyyden vaihtelut viimeisten 7500 vuoden ajalta (Helama ym. 2010). Auringon säteily vaikuttaa ilmastoon sekä viiveettömästi (A) että merten puskurivaikutusten kautta vuosikymmenien viiveellä (B).

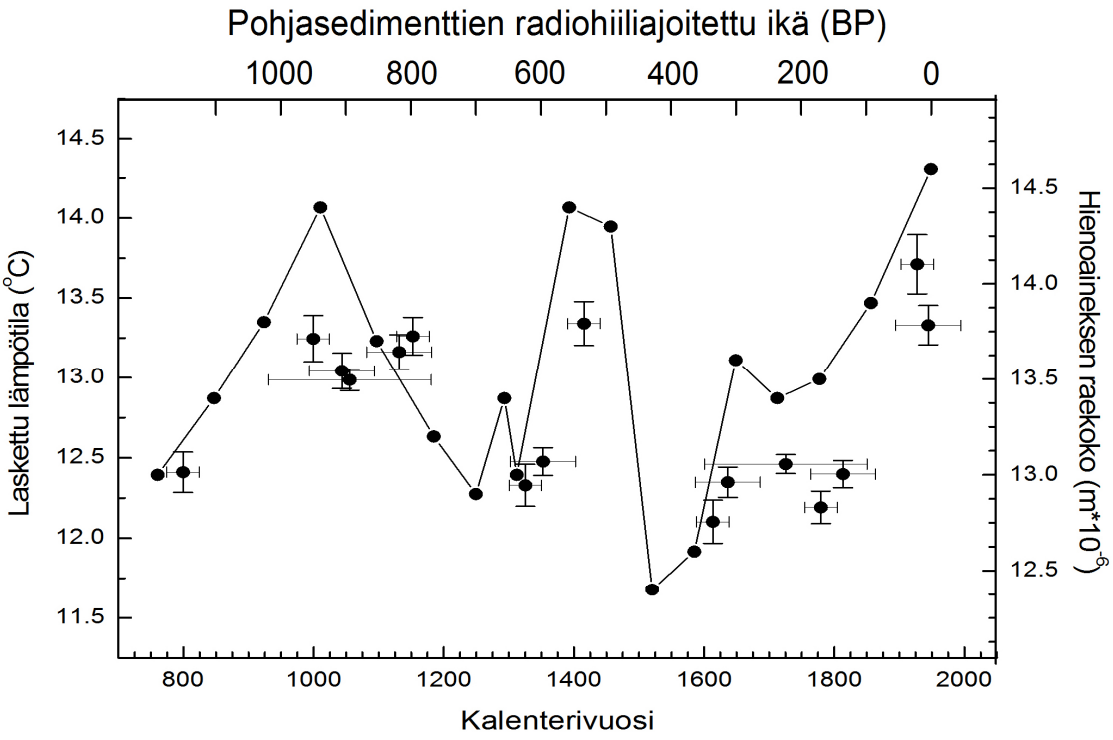
Tekemämme tutkimus osoitti Lapin ilmaston vaihdelleen auringon aktiivisuuden tahtiin. Auringonpilkut sopivat yhteen 6000 vuoden takaisen lämpöjakson, Keskiajan lämpökauden, pikku jääkauden ja 1900 -luvun alkupuolen lämpenemisen kanssa. Merkittävä havainto oli myös se, että puulustoista arvioidut lämpötilat ovat seuranneet auringon aktiivisuuden muutoksia usean vuosikymmenen viiveellä. Viiveen arvellaan aiheutuvan merten lämpökapasiteetista, joka toimii eräänlaisena puskurina ilmaston muutoksissa. Tämä selittää osittain myös sen, miksi jo muutama vuosikymmen sitten aktiivisuushuippunsa saavuttanut Aurinko on edelleen lämmittänyt maapallon ilmastoa.

Alueelliset ilmaston muutokset

Merten vaikutus maapallon, mutta erityisesti paikallisilmastojen muutoksiin on monimutkainen, voimakas ja osin tuntematon. Meriveden lämpötilaerot ja suolapitoisuuden vaihtelut ovat ajureina merivirroille ja tuulille, jotka siirtävät auringon lämpöä ja haihtuvaa kosteutta paikasta toiseen. Suomen ja koko Fennoskandian sijainti kostean Atlantin valtameren ja kuivemman Euraasian välissä tekee ilmastomme vaihtelusta erityisen vaikeasti ennustettavan.

Meriveden suolapitoisuuden eroista ja vaihteluista aiheutuvan termohaliinikierron (Golf -virran) voimistuminen aikaskaaloilla 50 - 250 vuotta on tuonut Lappiin lämpimiä kesiä. Tämä on selvinnyt verrattaessa Pohjois-Atlantin pohjasedimenttien koostumusta Lapin puulustoista ennustettuun heinäkuun keskilämpötilaan 800 -luvulta nykypäivään (kuva 5). Kierron heiketessä kesät ovat olleet keskimääräistä viileämpiä vuosikymmenien tai vuosisatojen ajan. Kuvan 3

eripituiset vaakajanat kuvaavat Lapin puulustoista arvioitua heinäkuun lämpötilaa 50, 100 ja 250 vuoden keskiarvoina. Lämpimin 250-vuotisjakso on osunut "puiden kertomana" Keskiajan lämpökaudelle (931 - 1180) ja kylmin pikku jääkaudelle (1601 - 1850). Lyhytaikaisimpia lämpöjaksoja on esiintynyt 1900 -luvulla, 1400 -luvulla ja vuoden 1000 tienoilla. Keskiajan lämpökauden lämpimyys on uusimman lustotiedon mukaan aliarvio, koska maapallonlaajuinen "megakuivuus" kompensoi osittain lämpimien kesien positiivista vaikutusta vuosilustoihin (vrt. kuva 1).

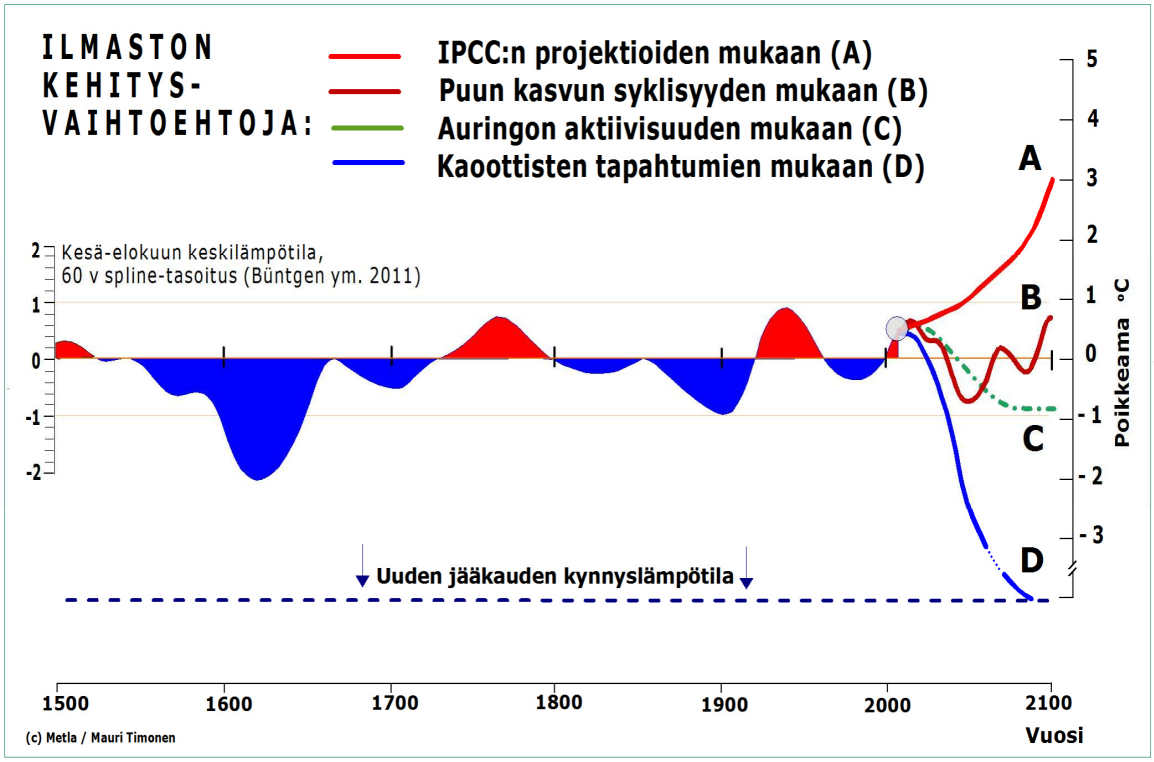


Kuva 5. Atlantin pohjasedimenttien hienoaineskoostumuksen vaihtelu (yhtenäinen viiva) verrattuna Lapin puulustoista arvioituun heinäkuun lämpötilaan. Vaakajanat kuvaavat 50, 100 ja 250 vuoden keskiarvoja (Helama ym. 2009).

Vaihtoehtoisia ilmastoennusteita

Hallitustenvälisen ilmastopaneelin (IPCC) neljännen arviointiraportin (2007) mukaan maapallon ilmaston lämpenemisen päätekijä on ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu. Paneelin tekemät ennusteet perustuvat tietokonemalleihin, jotka pyrkivät jäljittelemään ilmakehän fysikaalisia prosesseja. Mallit on sovitettu menneiden vuosikymmenten ilmaston vaihteluihin ja ilmakehän mitattuun hiilidioksidipitoisuuteen. IPCC: n mallilaskelmien mukaan Maapallon pintalämpötila nousee kuluvan vuosisadan loppuun mennessä 1,1 - 6,4 °C verrattuna jakson 1980 - 1990 tilanteeseen. Lämpenemisennuste on kaksinkertainen 6000 vuoden takaiseen lämpenemiseen verrattuna (Kuva 6, A).

Ilmaston syklinen luonne antaa mahdollisuuden arvioida ilmaston tulevaa luontaista vaihtelua myös puulustojen ja auringon aktiivisuuden pohjalta. Timosen (2010) ennuste perustuu 1500-luvulta saakka säännöllisesti 60 - 95 vuoden jaksoissa vaihdelleen sarjan ekstrapolointiin (B). Ennuste viittaa 1 - 2 asteen viilenemiseen kuluvan vuosisadan puoliväliin mennessä. Abdussamatovin (2009) aurinkosykleihin perustuva ennuste on lähivuosikymmeninä samansuuntainen (C).



Kuva 6. Hiilidioksidiin (A), männyn kasvun syklisyyteen (B), auringon aktiivisuuteen (C) ja kaoottisiin tapahtumiin (D) perustuvia ennusteita kesälämpötilojen tulevasta kehityksestä (A = IPCC, B = Timonen 2010, C = Abdussamatov 2009).

Puulustojen ja auringon syklisiin vaihteluihin perustuvat ennusteet viittaavat 1 - 2 asteen suuruiseen viilenemiseen kuluvan vuosisadan puoliväliin mennessä, mikä ankarimmillaan tarkoittaa parin sadan vuoden takaisen pikku jääkauden kaltaista jaksoa. Ennusteet perustuvat vuosien ja vuosikymmenten väliseen luontaiseen ilmastonvaihteluun ilman ihmisen vaikutusta. IPCC:n malleista puuttuvat puolestaan auringon aktiivisuuden pitkäaikaisvaikutukset.

Kaoottisiin tapahtumiin perustuvien ennusteiden toteutuminen edellyttää äkillistä muutosta maapallon ilmastodynamiikassa. Sellaisen voi aiheuttaa jättiläistulivuoren purkaus, Golf-virran hyytyminen tai asteroidin iskeytyminen Maahan. Tämäntyyppiset ilmiöt ovat toistuneet ja tulevat vastakin toistumaan ennalta aavistamattomin väliajoin. Uuden jääkauden kynnyslämpötila perustuu ajatukseen siitä, että jääkautiset lämpötilat ovat olleet vain nelisen astetta nykyistä alempia (Bradley & Eddy 1991).

Päätelmiä

Lapin männyn vuodentarkka lustokronologia on koko maailman pisimpiä havupuusarjoja. Tuhannet nykyisen Metsä-Lapin ja puuttoman Tunturi-Lapin järvistä löytyneet megafossiilimännyt kertovat menneistä lämpö- ja kylmäkausista. Lustoanalyysit viittaavat historian kirjoista tutun, tuhannen vuoden takaisen Keskiajan lämpökauden olleen yhtä lämmin tai lämpimämpi kuin 1930 -luku. Itä-Suomen mäntykronologia ja eri puolilta maailmaa kerätyt muut proksitiedot osoittavat ajanjakson olleen maailmanlaajuisesti poikkeuksellisen kuiva. Lapin männyissä näkyy myös merkkejä Golf -virran sekä Pohjois-Atlantin ja Tyynen valtameren sääilmiöiden (NAO, AMO, ENSO) pitkäaikaisista vaihteluista.

Viime aikojen ilmastokeskustelu on keskittynyt pääosin Maapallon keskilämpötilan muutokseen ja ihmisen osuuteen sen aiheuttajana. Olipa muutoksen syy mikä tahansa, sopeutumisen kannalta tärkeintä olisi ennakoida globaalien keskiarvojen sijaan paikallisilmastojen todennäköisiä muutoksia. Vuosilustojen ja merten pohjasedimenttien tarkastelu viittaavat siihen, että auringon aktiivisuudella ja maapallon akselikulman muutoksilla on aiemmin arvioitua suurempi vaikutus koko maapallon ilmastoon ja merivirroilla sekä tuulten suunnilla Suomen ilmastoon.

Kasvihuonekaasujen pitoisuuksiin pohjautuvien ilmastoennusteiden suurimmat heikkoudet ovat auringon ja merten syklisten pitkäaikaisvaikutusten puutteellinen käsittely sekä mallien hyvyyden arviointiin käytetyn ajanjakson lyhyys. Jaksollisten vaihteluiden huomiotta jättäminen voi johtaa vääriin tulkintoihin. On mahdollista, että 1850-, 1930- ja 1990-luvuilla alkaneet muutaman vuosikymmenen mittaiset lämpenemiset sekä niiden väliin sattuneet viilenemiset ovat ainakin osittain ilmaston luontaista vaihtelua.

Luontaista ilmastohistoriaa koskevien tutkimusten pääsanoma on, ettei muutaman vuosikymmenen tai viimeisen vuosisadan ilmastokehitys anna riittävää kuvaa paikallisilmastomme tulevan muutoksen suuruudesta tai edes suunnasta. Merellisen Atlantin ja mantereisen Siperian välissä sijaitsevassa Suomessa on uhkarohkeaa laskea tasaisesti lämpenevän ilmaston varaan. Puulustoista arvioiduilla kahden asteen lämpötilan muutoksilla vuosisatojen välillä on ollut historiatiedon mukaan dramaattisia vaikutuksia ihmisyhteisöihin erityisesti asutuksen äärirajoilla.

Pohjoisen pallonpuoliskon ilmaston pitkän ajan luontainen pääsuunta on ollut vähittäinen viileneminen kohti seuraavaa jääkautta. Maapallon akselikulman ja kiertoradan vaihteluiden aiheuttaman tasaisen kylmenemisen ohella ilmastoa ovat säädelleet vuosikymmenten ja vuosisatojen aikaskaalassa tapahtuneet auringon aktiivisuuden ja merivirtojen voimakkuuden vaihtelut. Suomen paikallisilmaston ratkaiseva tekijä on tulevaisuudessakin Atlantin valtameri ja sen aiheuttamat sääilmiöt. Se, missä määrin ihminen voi näihin luonnon trendeihin ja vaihteluihin vaikuttaa ja kuinka muutoksiin sopeudutaan, vaatii vielä paljon monitieteistä tutkimusta.

Kirjallisuus:

Abdussamatov, K.I. 2009. The Sun defines the climate. Nauka i Zhizn ("Science and Life"), s. 34 - 42.

Helama, S., Macias Fauria, M., Mielikäinen, K., Timonen, M. & Eronen, M. 2010. Sub Milankovitch Solar Forcing of Past Climates: Mid and Late Holocene Perspectives. Geological Society of America, Bulletin 122: 1981 - 1988.

Helama, S., Timonen, M., Holopainen, J., Ogurtsov, M.G., Mielikäinen, K., Eronen, M.,Lindholm, M. & Meriläinen, J. 2009. Summer temperature variations in Lapland during the Medieval Warm Period and the Little Ice Age relative to natural instability of thermohaline circulation on multi-decadal and multi-centennial scales. J. Quaternary Sci. 24: 450-456.

Esper, J., Frank, D.C., Timonen, M., Zorita, E., Wilson, R., Luterbacher, J., Holzkämper, S., Fischer, N., Wagner, S., Nievergelt, D., Verstege, A. & Büntgen, Ü. 2012. Milankovitch -type forcing of tree-ring data and implications for large-scale temperature reconstructions.

Kultti, S., Mikkola, K., Virtanen, T., Timonen, M. & Eronen, M. 2006. Past changes in the Scots pine forest line and climate in Finnish Lapland: a study based on megafossils, lake sediments, and GIS-based vegetation and climate data. The Holocene 16: 381–391

Milankovitch, M. 1941. Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem, Königlich Serbische Akademie, Belgrad, Spezialband 132.

Solanki, S.K., Usoskin, I.G., Kromer, B., Schüssler, M. & Beer, J. 2004. Unusual activity of the Sun during recent decades compared to the previous 11,000 years: Nature, v. 431, p. 1084–1087, doi: 10.1038/nature02995.