

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

### Metsät ja ilmastonmuutos: MIL-tutkimusohjelmasta uutta tietoa

Maapallon metsät ovat hiilinielu, ja potentiaalisesti niillä on tärkeä rooli ilmastonmuutoksen hillinnässä. Tropiikin metsien hävityksen vuoksi hiilinielu on kuitenkin vaarantunut ja nykyisellään metsien globaali nettonielu jää alle puoleen (46 %) metsien potentiaalisesta hiilinielusta (noin 2.4 Pg C/vuosi; Pan ym. 2011. Science 333, 988–993). Alueellisesti ja maakohtaisesti metsien merkitys hiilinieluna vaihtelee. Suomessa metsät ovat merkittävä nielu; se kattaa noin 40 % vuotuisista kasvihuonekaasupäästöistä.

Ilmakehän hiilidioksidipitoisuus, 391 ppm, on 40 % korkeampi kuin esiteollisena aikana vuonna 1750.

Globaalit hiilidioksidipäästöt olivat vuonna 2010 noin 9 Pg C ja ovat edelleen nousussa kehittyvissä talouksissa, etupäässä Kiinassa ja Intiassa, tapahtuneen hiili-intensiivisen talouskasvun seurauksena. Viime vuosina ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu onkin ollut ennätyksellisen voimakas, noin 2.5 ppm vuodessa, mikä kertoo ilmastonmuutoksen nopeutuvasta tahdistista.

Hillintätoimien tehottomuuden ja hitauden vuoksi sopeutumistoimet ovat avainasemassa, jotta ilmastonmuutoksesta aiheutuvia riskejä voidaan estää tai vähentää. Metsien ja myös metsätalouden osalta sopeutuminen on ongelmallista metsäpuiden pitkäikäisyyden vuoksi. Metsissä tapahtuvien muutosten havainnointi on ensiarvoisen tärkeää, jotta muutosten merkitys voidaan ottaa huomioon metsätalouden toimintatavoissa mahdollisten riskien välttämiseksi. Ennakointia tarvitaan, jotta metsien tuottamat moninaiset palvelut turvataan myös tuleville sukupolville.

Metsäntutkimuslaitoksen tutkimusohjelma 'Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL)' aloitettiin vuonna 2007. Ohjelman tavoitteena oli tuottaa tietoa

- ilmastonmuutoksen vaikutuksista Suomen metsiin ja metsäekosysteemeihin
- metsien kyvystä sopeutua ja keinoista edistää sopeutumista ilmastonmuutokseen
- ilmastonmuutoksen aiheuttamista riskeistä metsien terveydelle ja
- metsäpoliittisten ohjauskeinoista ja niiden merkityksestä osana kansallista ja kansainvälistä ilmastopoliittista toimintaa ilmastonmuutoksen hillinnässä.

Tutkimusohjelma koostui 14 tutkimushankkeesta, ja tutkimusaiheina olivat edellä mainitut teemat. Vuosi 2012 on MIL-tutkimusohjelman viimeinen toimintavuosi. Valtaosa ohjelman töistä on jo julkaistu vertaisarvioituissa kansainvälisissä sarjoissa, ja kirjallisuusviitteet valmistuneista julkaisuista löytyvät tutkimushankkeiden verkkosivuilta.

Osana MIL-tutkimusohjelman raportointia ja tulosten jalkautusta tutkimushankkeet ovat tuottaneet tutkimustuloksista ja niiden merkityksestä lyhyet selosteet, jotka on [koottu kokonaisuudeksi](#) näille verkkosivuille. MIL-ohjelma on yhdessä 'Bioenergiaa metsistä (BIO)' tutkimus- ja kehittämisohjelman kanssa laatinut myös yhteisen synteisiraportin '[Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät](#)' (Metlan työraportteja/Working Papers of the Finnish Forest Research Institute 240).

Toivomme, että nämä raportit ovat hyödyllisiä tiedonlähteitä päätöksentekijöille, metsäammattilaisille, metsänomistajille, tutkijoille, opiskelijoille ja myös muille metsistä ja niiden tulevaisuudesta kiinnostuneille lukijoille.



Kuva: Metla/Erkki Oksanen



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

*Elina Vapaavuori*  
MIL-tutkimusohjelman johtaja

[☞ MIL-tutkimusohjelman loppuraportin sisältö](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036195>

Päivitetty: 04.10.2012 /KPB/SJor

| Copyright Metla | [Palaute](#)

---

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

[MIL-kotisivu](#)

[Loppuraportti](#)

[Raportin sisältö](#)

## Loppuraportin sisältö

### Metsien kasvu ja sopeutuminen sekä hiilitalous

- [+](#) Suomen metsien kasvu on lisääntynyt: Mikä merkitys on ilmastolla?  
Hanke 3436, vetäjä: *Kari Mielikäinen*
- [+](#) Neulasjälkimenetelmällä (NTM) voidaan lukea mäntyyn ja kuuseen arkistoitunutta tietoa.  
Hanke 3435, vetäjä: *Risto Jalkanen*
- [+](#) Lämpenevät talvet – riskejä metsäpuillemme?  
Hanke 3489, vetäjä: *Tapani Repo*
- [+](#) Juuristosysteemi kangasmailla reagoi kasvuympäristön muutoksiin.  
Hanke 3528, vetäjä: *Maija Salemaa*
- [+](#) Soiden kasvihuonekaasutaseet muuttuvat ilmaston muuttuessa.  
Hanke 3491, vetäjä: *Tytti Sarjala*
- [+](#) Skenaariolaskelmien mukaan Suomen metsät järetyvät ja tihentyvät, ja hiilinielu kasvaa.  
Hanke 3442, vetäjä: *Elina Vapaavuori*

### Metsänjalostus

- [+](#) Metsänjalostuksella edistetään metsäpuiden sopeutumista muuttuvaan ilmastoon.  
Hanke 3439, vetäjä: *Pertti Pulkkinen*
- [+](#) Koivu sopeutuu muuttuvaan ilmastoon.  
Hanke 3440, vetäjä: *Matti Rousi*
- [+](#) Rauduskoivun siemensiirrot: kotimaiset, paikallisiin olosuhteisiin sopeutuneet siemenet paras valinta. Hanke 3442, vetäjä: *Elina Vapaavuori*, hanke 3440, vetäjä: *Matti Rousi ja hanke 3465, vetäjä: Pekka Saranpää*

### Metsäkasvillisuuden menestyminen

- [+](#) Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsäkasvien levinneisyysalueisiin ja kasviyhteisöjen rakenteeseen Suomessa. Hanke 3490, vetäjä: *Hannu Ilvesniemi*
- [+](#) Fenologisten seurannat antavat tietoa ilmaston muuttumisesta.  
Hanke 3517, vetäjä: *Eero Kubin*

### Metsien terveys

- [+](#) Lisääntyvätkö patogeenisienten aiheuttamat metsätuhot tulevaisuuden ilmastossa?  
Hanke 3437, vetäjä: *Michael Müller*
- [+](#) Ilmastonmuutos voi lisätä hyönteisten aiheuttamia metsätuhoja.  
Hanke 3438, vetäjä: *Seppo Neuvonen*
- [+](#) Nisäkkäiden aiheuttamat metsätuhot muuttuvassa ilmastossa.

[Hanke 3493](#), vetäjä *Heikki Henttonen*

## Metsäpolitiikka osana ilmastopolitiikkaa

☒ [Uusiutuvan energian tukipolitiikan kustannusvaikutukset ja tehokkuus: tukimuodolla tärkeä merkitys. Hanke 3441](#), vetäjä: *Jussi Uusivuori*

☒ [Metsät ilmastonmuutoksen hillinnässä ja siihen sopeutumisessa. Hanke 3527](#), vetäjä: *Maarit Kallio*

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Suomen metsien kasvu on lisääntynyt: Mikä merkitys on ilmastolla?

Suomen metsien kokonaiskasvu on lisääntynyt 1970-luvulta lähes 70 %. Osa kasvun lisäyksestä aiheutuu metsien käsittelystä ja sen aiheuttamista metsien rakenteen muutoksista. Soiden ojitus, nuorten metsien osuuden lisääntyminen ja metsien tihentyminen on arvioitu tärkeimmiksi kasvun lisäyksen syiksi.

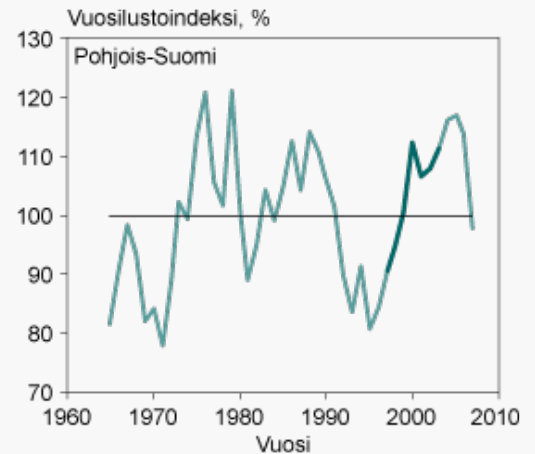
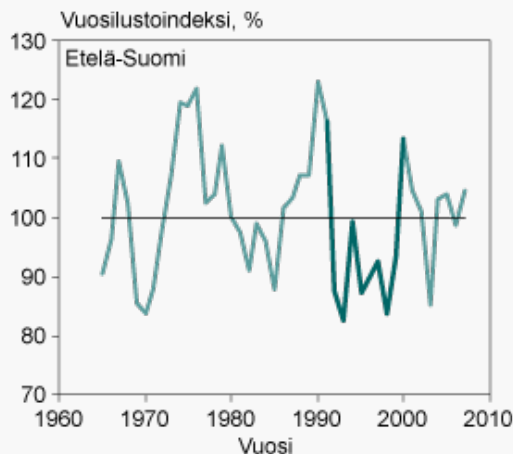
### Soiden ojitus ja männyn kasvu vaikuttaneet eniten kasvunlisäykseen

Valtakunnan metsien inventoinnit (VMI) antavat vastauksen metsänhoidon, metsänparannuksen ja maankäytön muutosten vaikutuksista Suomen metsien rakenteeseen ja kasvuun. Analyysit paljastavat metsien kasvun vaihdelleen jaksollisesti koko viime vuosisadan ajan.

Vaikka puulajien kasvut vaihtelevat yleensä hieman eri rytmissä, mittaukset paljastavat myös selkeitä kaikille puulajeille yhteisiä lamakausia. Viimeisin heikon kasvun jakso oli 1990-luvulla (VMI9), jolloin kaikkien puulajien kasvu oli Pohjois-Suomen mäntyjä lukuunottamatta selvästi alle pitkän ajan keskiarvon (kuva 1). Kasvun vuotuisen vaihtelun pääsyyt ovat ilmastollisia, mutta myös hyönteistuhot, sienitaudit, puiden kukkiminen ja siementuotanto voivat jättää jälkensä kasvuun.



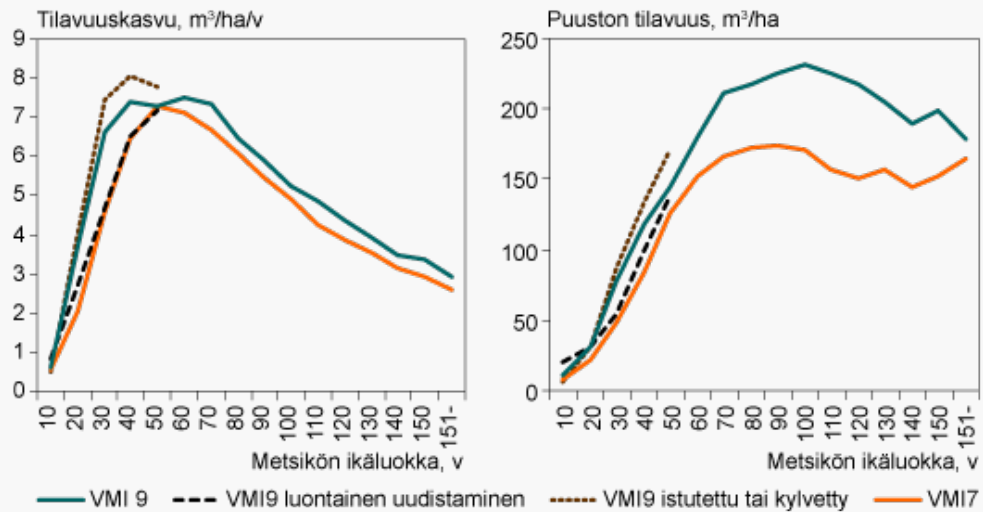
Kuva: Metla/Erkki Oksanen



Kuva 1. Männyn paksuuskasvun vaihtelu Etelä- ja Pohjois-Suomessa. Tuloksista on poistettu puiden iän ja metsikön tiheyden vaikutukset, minkä jälkeen vaihtelu on suhteutettu vuosien 1965–2007 kasvun keskitasoon (100).

Männyn kasvu on vaikuttanut voimakkaimmin viime vuosikymmenien kasvun lisääntymiseen. Kuusen kasvun nousua ovat hidastaneet 1990-luvun lopun heikot kasvuvuodet Etelä-Suomessa.

VMI:n mittaukset osoittavat myös 1960-luvulta lähtien perustettujen viljelymetsien aiempaa huomattavasti nopeamman kasvun (kuva 2). Nykymetsien 30 % korkeampi kasvu 1980-luvun alun vastaavanikäisiin metsiin verrattuna aiheutuu pääosin nuorten metsien tiheydestä, puiden tilajärjestyksestä ja runsaspuustoisuudesta sekä viljelypuiden rodullisesta ylivertauisuudesta.



Kuva 2. Etelä-Suomen metsien vuotuinen kasvu ja puuston tilavuus (m<sup>3</sup>/ha) vuosina 1996–2000 (VMI9, luontaiset ja viljellen perustetut metsiköt) ja 1977–1982 (VMI7).

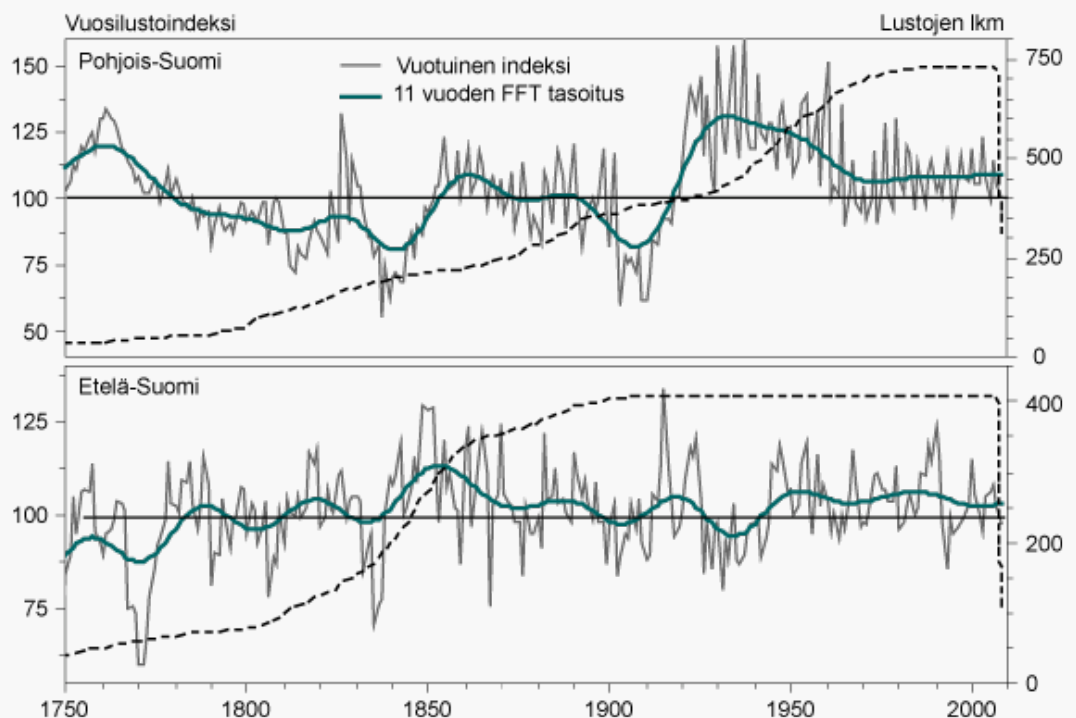
Toinen metsien kasvua voimakkaasti lisännyt tekijä on ollut soiden ojitus, joka on lisännyt turvemaiden kasvua 14 milj. m<sup>3</sup>/v 1950-luvulta vuoteen 2000 mennessä (VMI9). Tämä on lähes yhtä paljon kuin kivennäismaiden kasvun lisäys (17,5 milj. m<sup>3</sup>/v).

Metsien lannoituksen vaikutus metsien vuotuiseseen kasvuun on ollut korkeimmillaan 1970-luvun puolivälissä muutamia miljoonia kuutiometrejä. Nykyisellään lannoitusvaikutus on alle miljoona kuutiometriä vuodessa.

### Viljavuuden paraneminen lisännyt kasvua Etelä-Euroopassa

Ympäristötekijöiden aiheuttamien kasvutrendien tutkimukset alkoivat Euroopan laajuisesti Metlan ja Freiburgin yliopiston johdolla vuonna 1992. Silloinen tutkimus osoitti Keski-Euroopan metsien kasvun lisääntyneen ”selittämättömästi” ilman metsänhoitoa koko 1900-luvun ajan. Fennoskandian ja Venäjän Karjalan koskemattomissa luonnonmetsissä tehdyt analyysit eivät sen sijaan osoittaneet minkäänlaista kasvutrendiä. Vanhat puut kasvoivat edelleen samalla tavoin kuin vuosisadan alkupuolen samanikäiset puut olivat kasvaneet. Tutkimuksen päätelmien mukaan Keski-Euroopan kasvutrendin pääsyy oli metsämaiden viljavuuden paraneminen, joka aiheutui pääosin liikenteen ja maatalouden typpipäästöistä.

Mahdollisen ilmastonmuutoksen havaitsemiseksi tutkimus uusittiin Etelä- ja Pohjois-Suomessa 15 vuotta myöhemmin vuonna 2008. Luonnonsuojelualueilla kasvaneet männyt eivät edelleenkään osoittaneet kasvun muutosta ylös- eivätkä alaspäin (kuva 3).



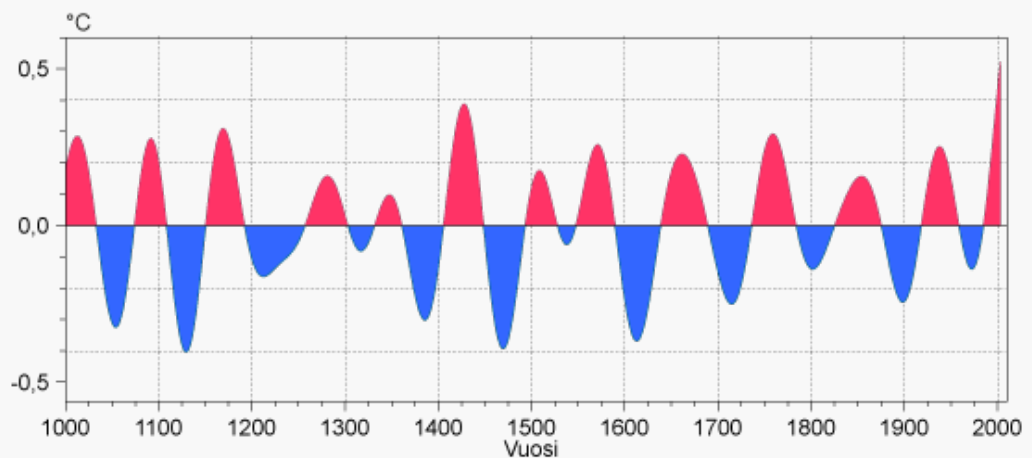
Kuva 3. Männyin kasvunvaihtelu Etelä- ja Pohjois-Suomessa 1700–2007 ei osoita trendinomaista muutosta Etelä-Suomessa 1900-luvun aikana. Pohjois-Suomessa kesien voimakas lämpeneminen ja sitä seurannut viileneminen 1900-luvun alkupuoliskolla näkyvät

Se, ettei puiden kasvussa näy merkkejä ilmaston trendinomaisesta muutoksesta, johtuu siitä, etteivät Suomen kasvukauden aikaiset lämpötilat ja sademäärät ole muuttuneet toistaiseksi trendinomaisesti. Kesät ovat lämmenneet 1900-luvun alusta 1930-luvulle saakka. Sen jälkeen ilmasto viileni 1960-luvulle ja säilyi viileänä parin vuosikymmenen ajan. 1990-luvulta lähtien lämpötilat ovat palautuneet ennalleen ja tasaantuneet viime vuosina ilman selkeää suuntaa.

## Ilmasto on muuttunut säännöllisen jaksollisesti vuosituhansien ajan

Runsas kymmenen vuotta sitten valmistunut Lapin mäntyjen 7640 vuoden mittainen vuosilustokronologia tarjoaa mahdollisuuden lähes koko jääkauden jälkeisen ajan ilmaston muutosten havainnointiin ja niiden syiden analysointiin. Vanhimpien megafossiilien löytöpaikat nykyistä metsänrajaa pohjoisempaan osoittavat Lapin kesien olleen Atlanttisella lämpökaudella noin 6000 vuotta sitten runsas 2,5 astetta nykyistä lämpimämpiä. Tuolloin koko Lappi oli järeiden mäntymetsien peittämä.

Vuosilustoanalyysien mukaan ilmasto viileni lämpökauden jälkeen selvästi. Kristuksen syntymän jälkeen Euroopassa vallinnut Rooman lämpökausi, sitä seurannut kylmeneminen ja noin vuoden 1000 paikkeilla vallinnut keskiajan lämpökausi näkyvät myös vuosilustojen leveyksissä. Viimeiset vuosisadat ennen 1900-lukua Suomessa palettiin pikkujääkauden kynsissä. Vaikka tuolloinkin oli väliin lämmintä, kylmyys merkitsi nälkävuosia, Islannin ja Grönlannin autioitumista ja ajoittaista Itämeren, Hollannin kanaalien ja Englannin Thames-joen jäätymistä.



Kuva 4. Lapin metsänrajamännyn kasvusta johdetun heinäkuun lämpötilan jaksollinen vaihtelu viimeisimmän vuosituhannen ajalta. Viidenkymmenen vuoden tasotusjaksolla laskettu kuvaaja osoittaa noin 85 vuoden säännöllistä vaihtelua, joka on otettava huomioon arvioitaessa tämän päivän ilmastonmuutosten syitä.

Pitkän lustosarjan mukaan ilmaston muutoksia on vuosituhansien ajan leimannut säännöllinen jaksollisuus (kuva 4). Vaikka kaikkien syklien alkuperää ja niissä tapahtuvia häiriöitä ei vielä kaikilta osin tunneta, niiden analysointi ja ennustaminen on olennainen osa myös tulevien muutosten arviointia. Vaikka ihmisen ilmakehään päästämää hiilidioksidia pidetään viime vuosikymmenien lämpenemisen pääsyyinä, luonnon omat syklit vaikuttavat edelleen. Ilmaston luontaista vaihtelua ja syklisyyttä tulee jatkossakin olemaan, mikä lisää epävarmuutta ennustemalleihin.

## Auringolla ratkaiseva merkitys ilmaston muutoksissa

Ilmaston muutokset voivat olla maapallon laajuisia tai ne voivat koskea jotakin rajoitettua aluetta. Suomen sijainti merellisen Atlantin valtameren ja mantereisen Siperian havumetsävyöhykkeen välissä antaa oman, vaikeasti selitettävän ja ennustettavan ”mausteensa” tulevan ilmastomme arviointiin. Golf-virran voimakkuus ja suunta yhdistettynä Atlantin muiden sääilmiöiden (NAO, AMO ym.) vaihteluun voivat muuttaa ilmastoamme jopa maapallon ilmaston muutoksen vastaisesti.

Lapin lustokronologian vertaaminen puulustoista arvioituun auringon aktiivisuuden vaihteluun paljasti auringon ratkaisevan merkityksen ilmaston muutoksissa. Auringon pilkut selittivät kaikki tähänastiset muutokset – myös 1900-luvun lämpenemisen. Lustoista arvioituna auringon aktiivisuus on ollut 1900-luvulla korkeimmillaan 7000 vuoteen. Tällä hetkellä aktiivisuus on kääntynyt laskuun, mikä saattaa merkitä luonnon prosessien alkavan viilentää maapallon ilmastoa. Auringon aktiivisuuden ja ihmisperäisen hiilidioksidin yhteisvaikutusta ei ole toistaiseksi mahdollista arvioida.

Puulustoista löytyy myös selityksiä vuosituhansia tapahtuneeseen ilmaston viilenemiseen ja Golf-virran ilmastovaikutuksiin. Maapallon akseli kallistaa tällä hetkellä pohjoista pallonpuoliskoa pois päin auringosta. Tämä näkyy Lapin mäntyjen lustoissa noin 2000 vuoden aikana lievänä viilenemisenä (0,3 astetta/1000 vuotta).

Vuosilustojen ja Englannin rannikon merenpohjan sedimentit osoittavat Golf-virran voimakkuuden

vaihtelevan jaksollisesti ja aiheuttavan pitkäaikaisia lämpö- ja kylmäkausia (Kuva 5). Keskiajan lämpökaudella Golf-virta oli voimakas ja pikkujääkaudella heikko. Golf-virran toiminnan moottorina on aurinko, jonka aiheuttama jäiden sulaminen muuttaa meren suolapitoisuutta ja sen seurauksena merivirtojen toimintaa. Lyhytaikaisia, vuoden tai vuosikymmenen kestäviä kylmäjaksoja voivat lustotutkimusten mukaan aiheuttaa myös suuret tulivuoren purkaukset.

## Metsänhoidolla voidaan varautua ilmaston muutoksiin

Metsien ikärakenne, runsaspuustoisuus ja soiden ojitus ovat saaneet aikaan Suomen metsien kasvun lähes kaksinkertaistumisen (55 milj. m<sup>3</sup>/v–105 milj. m<sup>3</sup>/v) 1900-luvun jälkipuoliskolla. Nuorten metsien runsaus ja tiheys (hoitamattomuus) ovat mahdollisuus metsien tehokkaalle ja monipuoliselle käytölle, mutta riski ilmaston muutosten vaikutuksille.

Jos myrskyt, kuivuus ja tuhohyönteiset lisääntyvät lähivuosikymmeninä, vaaravyöhykkeeseen joutuvat tiheät kuusikot, joita tuuli ja ihminen harventavat voimakkaasti. Riittävän varhaiset harvennukset ja hakkuualojen huolellinen rajausta vaativat lisää huomiota. Harvennushakkuut vahvistavat metsiä ja saavat ne järeytymään nopeammin, mikä parantaa metsien kasvatuksen kannattavuutta ja lisää niiden maisema-arvoa.

Puulustojen ja säätilastojen osoittama erittäin suuri ilmastollinen vaihtelu on tyypillistä Suomessa. Tämän vuoksi metsien uudistamisessa ja puu- sekä puualkuperävalinnoissa ei ole syytä tehdä nopeita ja rajuja muutoksia. Nyt istutettavien puiden tulee kestää myös tulevien 60–80 vuoden aikana eteensattuvat ilmaston vaihtelut ja muutokset.

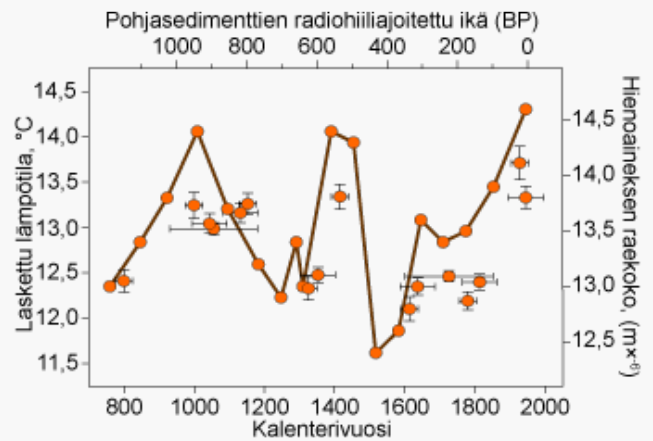
Kirjoittaja: *Kari Mielikäinen*

- Hankkeen vetäjä: professori [Kari Mielikäinen](#)
- Muut tutkijat: Simo Hannelius, Helena Henttonen, Mikko Hyppönen, Kristian Karlsson, Heikki Kauhanen, Harri Mäkinen, Pekka Nöjd ja Mauri Timonen
- Hanke 3436: [Suomen metsien kasvun lisääntymisen syyt ja seuraukset](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on <http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036196>



Kuva 5. Golf-virran voimakkuutta kuvaava Atlantin pohjasedimenttien koostumus (yhtenäinen viiva) sopii yhteen puulustoista arvioitujen lämpö- ja kylmäkausien kanssa. Vaakajanat kuvaavat heinäkuun lämpötiloja 50, 100 ja 250 vuoden keskiarvoina. Vuosituhannen lämpimin 250-vuotiskausi oli vuosina 931–1180 ja kylmin vuosina 1601–1850.

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

[MIL-kotisivu](#)

[Loppuraportti](#)

[Raportin sisältö](#)

### Neulasjälkimenetelmällä (NTM) voidaan lukea mäntyyn ja kuuseen arkistoitunutta tietoa

Metsäntutkimuslaitoksessa 1980-luvulla kehitetyllä männyn neulasjälkimenetelmällä tutkitaan ja visualisoidaan takautuvasti mennyttä ilmastoa sekä puuston kasvun ja kehityksen häiriötiloja. Menetelmää on myöhemmin menestyksellä käytetty ja kehitetty kansainvälisissä ympäristötutkimuksen konsortioissa.

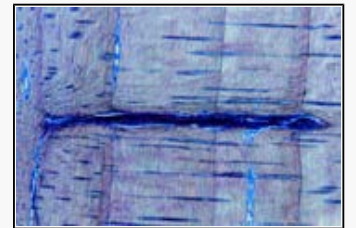
### Menetelmäkehittely takaa laadukkaampaa tietoa ilmastohistoriasta

Tutkimuksessa selvitettiin erilaisten neulastunnusten kuten neulasvuosikertojen määrän tai neulasen iän käyttömahdollisuuksia metsien terveydentilan ja harsuuntuneisuuden kuvaamisessa menneinä vuosisatoina ja suhteessa teolliseen aikakauteen. Myös pituuskasvun käyttöä menneen ilmaston rakentamisessa tutkittiin, koska se sisältää sädekasvua voimakkaamman ilmastosihtäimen männyn kasvun äärialueilla kuten Suomen Lapissa. Tämän tiedon pohjalta kuvattiin pohjoisen kesän lämpöolot viimeisten 1200 vuoden aikana ja selvitettiin pituus- ja paksuuskasvun ajoittumiseen vaikuttavia tekijöitä. Niin ikään tavoitteeksi asetettiin NTM-pohjaisen menetelmän kehittäminen neulasbiomassan aikasarjan rakentamiseksi.



Järvenpohjasta nostettuja puunrunkoja. Kuva: Risto Jalkanen

Tutkimuskohteena on ollut ennen kaikkea mänty, koska se muodostaa havumetsänrajan pohjoisessa. Tutkimusaineisto on pääosin Metlan Laanilan tutkimusalueesta, koska sen puusto on osoittautunut erittäin sopivaksi sekä ilmastosihtäimen laadun ja muiden ominaisuuksien että runsauden puolesta. Materiaali koostuu eri ikäluokkien elävistä (1540-luvulta nykypäivään) ja järvien pohjamutiin vajonneista (vv. 745–1750) männystä. Kasvun ajoittumista tutkittiin Laanilan ohella Metlan Kivalon tutkimusalueella ja Lapin tutkimuslaitos Kevon lähiympäristössä. Koska kuusen neulasjälkiä on mäntyyn verrattuna vaikea havaita luotettavasti, kuuselle laadittiin erillinen menettely, 6-NTM. Sen avulla muodostettiin 70-vuotiset neulasajasarjat.



Neulasjälki halkoo puun vuosilustoja. Kuva: Pekka Saranpää

Vuonna 1990 julkaistua neulasjälkimenetelmää laajennettiin siten, että nyt on mahdollista tuottaa neulasvuosikertojen määrän aikasarja koko puun elinkaarelle samoin perustein kuin metsien terveydentilan seurannassa tehdään vuosittain. Kuhunkin yksittäiseen NTM-muuttujaan liittyvä viesti kertoo esim. ilmastosta, puun ekofysiologiasta, puun kasvuympäristöstä tai muista puun kuntoon vaikuttavista tekijöistä kuten metsätuhojen esiintymisestä ja häiriödynamiikasta. NTM-tietoa yhdistämällä luotiin menetelmä, jolla voidaan rakentaa neulasbiomassan vaihtelua kuvaava aikasarja. Aina 1770-luvulta 2000-luvulle ulottuva aikasarja osoittaa männyn neulasen koon ja neulasbiomassan vaihtelevan suuresti.

Puun vuosirenkaissa eli -lustoissa vuorottelevat vaalea kevät- ja tumma kesäpuu. Heinä-elokuussa syntyvässä kesäpuussa on erittäin voimakas ilmastosihtäimi: mitä tiheämpi kesäpuu on, sitä lämpimämpi kesä on ollut. Perinteisesti kesäpuun tiheyden mittausta perustuu röntgensäteiden käyttöön. Menetelmä on työläs, ja laitteet ovat kalliita. Hankkeessa kehitettiin korvaava, sinisen valon heijastamiseen perustuva menetelmä. Se säästää kustannuksia ja työaikaa ja on nyt yleisessä käytössä dendrokronologian laboratorioissa.

Alailmakehän hiilidioksidipitoisuus on kohonnut teollisella kaudella (vuodesta 1850) merkittävästi fossiilisten polttoaineiden käytön seurauksena. Fossiilihiilen poltto vinouttaa menneen ilmaston kuvaamisessa käytettävää

hiili-isotooppien suhdetta ( $\delta^{13}C$ ) lisäämällä kevyen hiili-isotoopin määrää orgaanisessa materiaalissa suhteessa esiteollisen ajan ilmakehän koostumukseen. Hiili-isotooppisuhteen muutoksen huomioon ottamiseksi hankkeessa kehitettiin korjaava menetelmä, jotta hiili-isotooppiaikasarjat eivät vaarantaisi esiteollisen ajan lämpöolojen rekonstruktion luotettavuutta. Toinen hiili-isotooppiaikasarjan käytön ongelma on ollut pitkien sarjojen tuottaminen. Poistamalla yksittäisen puun sarjasta nuoruusvuodet – Lapissa 30–50 vuotta, todettiin, että jäljelle jäävä sarja voidaan yhdistää sellaisenaan eri aikakausina kerättyyn materiaaliin ilman niin sanottua ikäkorjausta.

## Männyn pituuskasvu aikaistunut, paksuuskasvu ei

Männyn ulkoisten mittojen lisääntymisen kannalta tärkeimpien vaiheiden, pituus- ja paksuuskasvun ajoittumista ja niiden ajallista vaihtelua on tutkittu Lapissa Kivalon (Vanttauskoski) ja Laanilan tutkimusalueista kerättyistä aineistoista. Tulosten mukaan männyn silmujen puhkeaminen on aikaistunut 6–8 päivällä 1960-luvulta 2000-luvulle. Yhtä varhainen tai vieläkin varhaisempi se on ollut 1900-luvun alkupuolella, erityisesti 1930-luvulla.

Sen sijaan läpimitan kasvun alkaminen ei ole aientunut merkittävästi. 2000-luvulla paksuuskasvu on käynnistynyt keskimäärin vasta kesäkuun alkupuolella, kun useana vuonna 1930–1940-luvuilla ja 1950–1960-luvuilla sädekasvu on alkanut jo toukokuun puolella. Tämä selittyy sillä, että ensimmäisten solujen muodostumiseen tarvittavaan lämpösummakertymäjaksoon sisältyy useimmiten myös kasvun pysäyttävä tai sitä merkittävästi hidastava kylmä jakso, jonka myötä aikainen kasvukausi normalisoituu ennen kuin 80–120 d.d.-yksikköä saavutetaan.

Suurin osa vuosikasvaimen pituudesta muodostuu kesäkuussa ja vuosilustosta kesäkuun puolivälin ja heinäkuun lopun välisenä aikana. Puuaineen muodostus pituuskasvun alkamisesta paksuuskasvun loppumiseen eli tilavuuskasvu kestää siten 83 päivää Vanttauskoskella, 64 päivää Laanilassa ja vielä vähemmän aivan metsänrajalla.

## Pituuskasvu määräytyy edellisen kesän sään perusteella...

Männyn kasvussa ensimmäisiä selvästi erotettavia vaiheita ovat silmun laajentuminen ja puhkeaminen sekä pituuskasvun käynnistyminen. Pohjoisessa männyn silmu alkaa venyä suurin piirtein silloin, kun lämpösumma alkaa karttua. Etelä-Lapissa se on keskimäärin toukokuun alkupuolella. Männyn pituuskasvu päättyy viimeistään heinäkuun alkupuolella, kun alueen lämpösummakertymän pitkäaikaisesta keskiarvosta on saavutettu 40 %.

Männyn kasvainten pituudet määräytyvät edellisen kesän, erityisesti heinäkuun alun lämpötilan perusteella. Jos kesät ovat pysyvästi lämpimämpiä, kasvuyksiköitä, joista suurin osa on neulasaiheita, syntyy enemmän ja sitä kautta kasvaimista tulee aiempaa pidempiä. Heinäkuun keskilämpötilan (~kesän keskilämpötilan) nousu yhdellä asteella lisää Lapin männyn pituuskasvua 1,8 cm, 2 astetta 3,6 cm jne.

Kun männyn latvakasvaimen on muodostunut päätesilmu, se sisältää informaation seuraavan kesän pituuskasvuun. Erityistapauksissa ja -olosuhteissa silmu voi kuitenkin alkaa venyä, puhjeta ja kasvaa pituutta saman kesän aikana. Tätä ns. jälkikasvua havaittiin poikkeuksellisen lämpimänä loppukesänä erityisesti viljavilla mailla ja taimitarhoilla niin männyllä kuin kuusella.

## ...paksuuskasvu puolestaan vallitsevan kesän mukaan

Silmujen puhkeamisesta kuluu neljä viikkoa paksuuskasvun alkamiseen. Tuolloin on kertynyt 12,5 % kasvupaikan keskimääräisestä lämpösummasta, 80–120 d.d.

Keskimäärin noin viikon kuluttua pituuskasvun päättymisestä alkaa muodostua kesäpuuta. Kesäpuun muodostus päättyy heinäkuun lopulla–elokuun alkupuolella, kun lämpösumma on kohonnut 80 %:iin keskimääräisestä lämpösummakertymästä. Riippumatta kesästä männyn paksuuskasvu loppuu Lapissa viimeistään elokuun toisella viikolla.

Läpimitan kasvu on pääosin riippuvainen kasvukesän olosuhteista, mistä on johdettavissa kasvamisen yleinen lainalaisuus: mitä lämpimämpi kesä, sitä leveämpi lusto. Tämä tapahtuu kuitenkin vain tietyissä aikarajoissa, jotka liittyvät paksuuskasvun alkamiseen ja päättymiseen: alkamista säätelee pääosin lämpötila ja loppumista päivänpituuden lyheneminen. Suomen oloissa lämmin loppukesä ei aktivoi jälsikerrosta uuteen solutuotantoon, vaan se vauhdittaa jo syntyneiden solujen valmistumista. Näin ollen ilmaston lämpenemisestä saatava lisäkasvu syntyy, jos lämpötilan kohoaminen osuu parhaaseen kasvuajankohtaan eli kesä–heinäkuulle.

Kasvunajoittumistutkimukset osoittavat joka tapauksessa, että puut kykenevät reagoimaan erinomaisen hyvin monenlaisiin olosuhteisiin. Siitä ovat osoituksena mm. silmunpuhkeamisajankohdan merkittävät vaihtelut jopa perättäisinä vuosina.

## Pituus- ja paksuuskasvu eri rytmissä

Kyetäkseen säilymään elinvoimaisena ja lisääntymään yksittäisen puun tulee kehittyä ja kasvaa niin, että se pärjää kilpailussa metsän tilasta, ravinteista ja valosta. Pituutta täytyy lisätä valossa pysymiseksi ja latvuksen kasvattamiseksi. Paksuuskasvun avulla puu vahvistaa rakenteitaan pystyasennossa pysymiseksi ja fysiologisten toimintojen ylläpitämiseksi. Koska runkopuusta tulee puun muotoinen, pitkä ja kapea, läpimitan kasvun ja

pituuskasvun täytyy olla suhteessa toisiinsa. Tämän puu tekee allokoimalla enemmän hiiltä vuoroin paksuuteen, vuoroin pituuteen. Vertasimme tätä suhdetta 150-vuotiaassa männikössä Laanilassa.

Kesäkuukaudet vaikuttivat eri tavoin pituus- ja paksuuskasvuun. Pituuskasvu korreloi yhden ja kahden vuoden viiveellä paksuuskasvun kanssa. Yhtäältä lämpimän kasvukauden ja hyvän kasvun ja toisaalta kylmän kasvukauden ja heikon kasvun välillä oli selkeä yhteys. Niinä vuosina, kun pituuskasvun ja sädekasvun suhde oli suuri, kasvun taso ja heinäkuun lämpötila ovat keskimääräistä alhaisempia. Kun tämä suhde on alhainen (hyvä sädekasvu, heikko pituuskasvu), kasvun taso ja keskipäivän lämpötila ovat selvästi keskimääräistä parempia. Tästä voidaan päätellä, että pituuskasvu on paksuuskasvua herkempi keskipäivän lämpötilalle.

## Laanilan vanhat männyt aloittaneet kasvun uudelleen

2000-luvun tutkimusten yhteydessä havaitsimme, että 100–300-vuotiaat Laanilan männyt olivat alkaneet kasvaa uudelleen pituutta sen jälkeen, kun niiden latva oli jo pyörästynyt pituuskasvun hiipumisen merkiksi. Neulasjälkimenetelmä paljasti, että pituuskasvun elpyminen eli sekundaarinen pituuskasvu on alkanut jo 30–40 vuotta aikaisemmin, joten 1970-luvun alkupuolen lämpimät kesät lienevät vauhdittaneet positiivista kehitystä. Esimerkiksi eräs Laanilan tutkimusmetsässä kasvanut 300-vuotinen mänty oli käyttänyt latvansa viimeisten 1,5 metrin kasvattamiseen 120 vuotta, josta ajasta ensimmäiseen metriin aikaa oli mennyt 100 vuotta ja loput 50 cm olivat kasvaneet 20 vuodessa.

## Neulastiheys paljastaa puun kehityksen häiriökaudet

Latvuksen tilan pitkäaikaisvaihtelun kuvaamiseksi hankkeessa tuotettiin neulasjälkimenetelmän avulla aikasarjat neulasvuosikertojen määrän, neulastiheyden sekä neulastuotannon ja neulaspoistuman vaihteluista 1500-luvulta 2000-luvulle. Yhdessä pituus- ja sädekasvutarjojen kanssa ne valaisevat männyn tilaa vuosisatoja taaksepäin ja osoittavat esimerkiksi, että neulasvuosikertojen määrä on aina vaihdellut. Neulastiheyden muutosten avulla paljastuivat myös häiriökaudet viimeisten 400 vuoden aikana.

Keskimääräisinä vuosina neulastiheys (= kääpiöversojen määrä vuosikasvaimen pituutta kohden) määräytyy pituuskasvun tapaan jo edellisen kasvukauden aikana päätesilmun muodostuessa. Häiriöt puun kehityksessä nostavat neulastiheyttä merkittävästi.

Hyvä pituuskasvu tarkoittaa myös runsasta neulastuotantoa. Nuorimmat neulasvuosikerrat ovat merkittävimpiä nettotuottajia, joten runsas neulastuotanto mahdollistaa hyvän kasvun neulasten syntyä seuraavina parina vuotena, mikäli kasvuolosuhteet ovat suotuisat. Neulasiin on myös sitoutunut energiaa, jota huonoina vuosina voidaan siirtää etenkin vanhemmista neulasvuosikerroista uuden kasvun turvaamiseksi.

## Pohjoisen ilmaston tuhatvuotinen historia

Selvitimme neulasjälkimenetelmän käyttöön perustuvan 1263-vuotisen männyn pituuskasvu-aikasarjan avulla kesälämpötilojen vaihtelun vuodesta 745 nykypäivään. Tutkimustulosten mukaan Lapissa lämpimät ja kylmät jaksot ovat vuorotelleet läpi vuosituhannen. Lämpötilan nousu 1900-luvulla näyttää keskittyneen vuosisadan alkupuolelle. Jakso 1900-luvun puolivälistä nykyaikaan ei osoittautunut poikkeukselliseksi yli 1000-vuotisessa lämpötilahistoriassa. Havaittu ilmastosihtuaali vahvistui merkittävästi, kun pituuskasvun, lustonleveyden ja kesäpuun maksimitiheyden ilmastosihtuaalit kesän lämpötiloista yhdistettiin.

## Historiallisista dokumenteista lisävalaistusta ilmaston kehitykseen

Pitkäkestoisten ilmastollisten muutosten havaitsemiseksi käytetään mitattujen säätietojen ohella instrumentaalijan taakse ulottuvia aikasarjoja, jotka perustuvat esimerkiksi puiden vuosikasvuihin tai historiallisiin dokumentteihin kuten järvien ja jokien jäänlähdeajankohtiin. Rakensimme Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämän Tornionjoen jäänlähdeajankohin avulla huhti–toukokuun lämpötilan vuosille 1693–2011.

Jäänlähdeajankohin saatu lämpötila selittää 67 % mitattun lämpötilan vaihtelusta ja kuvaa luotettavasti kevään lämpöoloja koko Suomessa. Sarjan mukaan kevät ovat aientuneet ja lämmenneet merkittävästi viimeisten yli 300 vuoden aikana. Kun verrataan 10-vuotisjaksojen 1700–

### Puun proksiaineistojen tulkinta vaatii osaamista

#### *Hiili-isotooppisarjassa pilvisuus mukana*

Puun vuosilustoista saatavaa hiili-isotooppiaikasarjaa on lähes kriittittä pidetty puhtaana kesälämpötilan kuvaajana. Tuloksemme kuitenkin osoittivat, että hiili-isotooppisarja kuvaa paremmin auringon säteilyn määrää tai pilvisyyttä kuin pelkästään lämpötilaa. Näin hiili-isotooppien käyttö yksinomaan lämpötilojen kuvaajana on voinut johtaa merkittäviin tulkintavirheisiin menneiden kylvien ja lämpimien jaksoiden osalta. Uusien tulosten mukaan ns. pikkujääkauden aikana kesäilmasto oli aurinkoinen, mutta kylmä.

#### *Signaalien katoaminen (divergenssi)*

Menneen ilmaston rekonstruktiossa käytetään hyväksi tutkittavan muuttujan ja ilmastotekijän välistä riippuvuutta aikana, jolta on mitattua ilmastotietoa. Jos tämä riippuvuusuhde kuitenkin jostain syystä heikkenee tilapäisesti tai katoaa kokonaan, puhutaan divergenssi-ilmiöstä. Laanilassa normaalisti sekä pituus- että sädekasvuun sisältyvä lämpötilasihtuaali katosi lyhytaikaisesti kokonaan vuosina 1999–2004 kuivuuden takia. Laanilan männyn pituuskasvujen perusteella havaittiin kolme muuta poikkeamajaksoa viimeisten 100 vuoden aikana viitaten siihen, että divergenssi ei ole vain nykypäivän ilmiö.

#### *Lämpötilasihtuaalin huojunta*

Jos jokin ilmastosta riippuvainen ominaisuus, esimerkiksi pituuskasvuyksiköiden syntyminen Lapissa muodostuu varsin lyhyessä ajassa, ehkä noin viikon aikana heinäkuun alussa, on helppo kuvitella, kuinka tämä viikon jakso voi eri vuosina sijoittua selvästi erilaisiin kohtiin kesää. Tällöin myös voimakkaimman ilmastosihtuaalin ajankohta vaihtelee. Testasimme ilmastosihtuaalin vaihtelua 1900-luvulla lustonleveyden ja maksimitiheyden osalta. Laanilassa 31 päivän

1709 ja 2000–2009 keskiarvoja keskenään, jäänlähtö on aientunut 14 vuorokautta ja lämpötila kohonnut 2,5 astetta. Ennen teollista kautta (v. 1850) lämpötila oli kohonnut pikkujääkauden kylmyydestä 1,2 astetta. Huhti-toukokuun lämpötila on jaksoittain kohonnut koko havaintojakson ajan 1600-luvulta nykypäivään.

mittaisen jakson voimakkain signaali vuosiluston osalta vaihteli useita viikkoja viimeisten 100 vuoden aikana. Kun merkittävimmän signaalin jakso ajoittui keskimäärin heinäkuulle, se oli vuosisadan alussa vv.1913–1942 osittain myös elokuun puolella ja vuosisadan lopussa vv.1973–2002 osittain jo kesäkuun puolella.

Hankkeen tulosten perusteella on selvää, että pohjoisen ilmasto vaihtelee jatkuvasti, on vaihdellut ennen ja näyttää vaihtelevan edelleenkin. Myös kesälämpötila on vaihdellut selvin jaksoin viimeisten 1200 vuoden aikana. Pohjoisen kesäilmasto ei ole lämmennyt, vaan viime vuosikymmenten kesälämpötilat asettuvat normaaliin vaihteluun. Tämä on sopusoinnussa Lapin pisimmän instrumentaaliaikasarjan kanssa.

Kirjoittajat: *Risto Jalkanen, Tarmo Aalto, Markus Lindholm, Pekka Närhi ja Hannu Salminen*

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Risto Jalkanen](#)
- Muut tutkijat: Markus Lindholm ja Hannu Salminen
- Hanke 3435: [NTM-aikasarjat ympäristö-, metsien terveydentila-, metsäekosysteemi- ja ilmastotutkimuksissa sekä puun kehityksen visualisoinnissa](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036197>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Lämpenevät talvet – riskejä metsäpuillemme?

Ilmaston lämpenemisen ennustetaan vaikuttavan erityisesti pohjoisen havumetsävyöhykkeen talvien sääoloihin: keskilämpötilat nousevat, talvisateet lisääntyvät, lumipeite ohenee ja routa vähenee. Lumipeite suojaa puiden juuria roudalta. Lämpeneminen voi muuttaa tilannetta, mikäli sadannan alueellinen ja ajallinen jakaantuminen sekä olomuoto muuttuvat.

Koska alhaisia pakkaslämpötiloja todennäköisesti esiintyy talvikuukausina myös tulevaisuudessa, routa tuskin häviää kokonaan. Talvisateen kulkeutuminen jäätyneeseen maahan voi lisätä maan routimista. Maan sulamis- ja jäätymissyklit voivat myös toistua useammin. Tulva, maan pintaan syntyvä jääkerros tai korkealle noussut pohjavesi heikentävät maan happitilannetta, mikä voi vahingoittaa juurten elintoimintoja.

Maaperäolojen talviaikaisilla muutoksilla on todennäköisesti vaikutuksia juuriin ja niiden kautta puiden kasvuun. Ilmastonmuutos ja juuret -tutkimuksessa tuotettiin uutta tietoa roudan, routimisen ja tulvan vaikutuksista puiden juurten ja verson toimintaan ja kasvuun. Tutkimuksessa käytetyt puulajit olivat mänty (*Pinus sylvestris* L.), kuusi (*Picea abies* (L.) Karst.), rauduskoivu (*Betula pendula* Roth) ja hieskoivu (*Betula pubescens* Ehrh.). Tulosten perusteella arvioitiin puiden menestymistä muuttuvissa ilmasto-oloissa.

## Yksittäisillä vähälumisilla talvilla vain vähän vaikutusta kuusten kasvuun

Tutkimuksessa selvitettiin lumipeitteen vähenemisen ja roudan lisääntymisen vaikutuksia puiden elintoimintoihin ja kasvuun. Tutkimusta varten itäsuomalaisessa kuusikossa järjestettiin koe, jossa routaoloja muutettiin keinotekoisesti. Koe toistettiin kahtena peräkkäisenä talvena, jotka poikkesivat sääoloiltaan toisistaan.

Tutkimustulosten perusteella voidaan arvioida, että yksittäiset vähälumiset talvet eivät liene kuusen kannalta ongelmallisia. Pitkällä aikajänteellä ja usein toistuessaan lumettomuus ja viivästynyt roudan sulaminen voivat heikentää puiden kasvua ja silmuvaurioiden seurauksena vähentää biomassan tuottoa. Erityisesti metsämaissa, joiden vedenpidätyskyky on suuri ja roudan muodostuminen täten voimakasta, ylläluvattu tilanne ja sen seuraukset voivat olla mahdollisia. Lisäksi puulajit, joilla on pinnallinen juuristo, kuten kuusi, ovat alttiita roudan vaikutuksille.

## Puut kestivät talvitulvaa, mutta routiminen haitallista

Tutkimuksessa selvitettiin kammiokokeiden avulla, miten routa ja tulva sekä jäiseen maahan lisätty vesi jäätyessään vaikuttavat männyn ja rauduskoivun elintoimintoihin ja kasvuun. Männyn taimia kasteltiin jäiseen, sulavaan ja



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

### Lumimanipulaatiokoe kuusikossa

Kokeen käsittelyt: 1. normaali lumipeitteen kertyminen ja sulaminen, 2. lumikerroksen pitäminen muutamassa sentissä talven ajan ja sulaminen luontaisesti ja 3. lumen poistaminen talvella ja maanpinnan eristäminen keväästä kesään. **Päätulokset:**

- Roudan hidas sulaminen viivästytti hienojuurten kasvun käynnistymistä, mutta loppukesällä kasvu saavutti saman tason kuin kahdessa muussa käsittelyssä. Myöhempinä kasvukausina juuret kasvoivat jopa paremmin kuin kahdessa muussa käsittelyssä.
- Lyhytjuurten keskimääräinen elinaika oli käsittelystä riippuen 276–305 vrk ja pitkäjuurten 425–464 vrk. Humuskerroksen juuret olivat lyhytikäisempiä kuin syvemmällä kivennäismaassa. Juurten elinaika oli pisin käsittelyssä 2.
- Uuden verson kasvu heikkeni, kun roudan sulaminen viivästyi. Samalla terveiden silmujen kokonaismäärä, osuus ja uusien vuosikasvainien määrä väheni. Versojen alentunut kasvu ja lukumäärän väheneminen vähentävät yhteyttävää neulaspinna-alaa ja siten myös puun tuottoa.
- Maan hidas sulaminen viivästytti rungon paksuuskasvun alkamista ensimmäisenä vuonna noin viikolla, mutta toisena vuonna käsittelyjen välillä ei ollut eroja. Käsittelyt eivät vaikuttaneet uusien putkisolujen muodostumisen eri vaiheisiin (jakaantuminen jällestä,

sulaneeseen maahan lepokauden loppuvaiheessa. Jo kerran tehty kastelu jäiseen maahan aiheutti juurivaurioita.

Kun kastelu toistettiin kolmesti, juurivauriot olivat niin vakavia, että yksi kasvukausi ei riittänyt juuristovaurioiden korjaamiseen. Juurivaurioiden vuoksi taimien vedensaanti heikkeni, mikä näkyi vanhempien neulasten heikentyneenä vesitulana. Käsittelyjen jälkeisenä kasvukautena syntyneissä neulasissa todettiin rakenteellinen sopeutuma veden vähyteen.

laajeneminen ja soluseinän muodostuminen), vuosilustojen leveyksiin eikä puun tiheyteen.

- Roudan hidas sulaminen lisäsi maan dityppioksidipäästöjä ja maahengitys lisääntyi kesä-heinäkuun aikana.

Toisessa kasvatuskammiokeessa tutkittiin 4-vuotiaiden mäntyjen vasteita lepokauden aikaisiin routa- ja tulvaoloihin. Maa joko jäädytettiin hitaasti ( $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) tai pidettiin sulana koko talven ( $+2\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Maaperän happitilanne huononi nopeasti tulvituksen seurauksena, mutta korjaantui pian kuusiviikkoisen tulvan päätyttyä. Tulvatalvea seuranneen kasvukauden lopussa hienojuurten kuivapainossa ei ollut eroja, mutta tulvan ja roudan yhteisvaikutus näkyi juurten pituuden ja juurtenkärkien lisääntymisenä ylimmässä humuskerroksessa ja vähenemisenä kivennäismaassa. Vaikka taimet selvisivät lepokauden tulvarasituksista, uusien neulasten kuivapaino jäi routataimilla alhaisemmaksi kuin sulassa maassa talvehtineilla taimilla. Tämä viittaa siihen, että energiavaroja käytettiin juurivaurioiden korjaamiseen verson kasvun kustannuksella.

Tulokset antavat viitteitä siitä, että talviaikainen sadanta jäiseen maahan ja siitä johtuva routiminen voi olla haitallista jopa isompien taimien kasvulle routaherkillä mailla. Männyn taimet kestävät lepokaudenaikaisia maaperän vähähappisia oloja ainakin muutaman viikon.

## Routa ja tulva lisäävät ilokaasua maaperässä



Ilokaasun mittauslaitteistoa maastossa.

Kuva: Jukka Alm

Ilokaasua eli dityppioksidia ja metaania voi syntyä sopivissa olosuhteissa kuolleen eloperäisen aineksen hajotessa. Dityppioksidia muodostuu yleisesti runsasravinteisilla metsäojitusalueilla tai suosta raivatuilla turvepelloilla, ja sillä on voimakas lämmitysvaikutus ilmakehässä. Metaania muodostuu hapettomissa oloissa, esimerkiksi ojittamattomilla soilla tai järvien mutapohjissa. Veden kyllästämiä kosteikkoja kuivemmilla mailla metsämaan mikrobit kykenevät ottamaan ravinnokseen ilmakehän metaania, jolloin metaani hapettuu hiilidioksidiksi.

Tutkimuksessa seurattiin roudan ja tulvan vaikutuksesta tapahtuvaa metsämaan dityppioksidin ja metaanin muodostumista humuskerroksen alapuolella olevassa kivennäismaassa. Maastokokeessa viivästetyn routimisen havaittiin johtavan kivennäismaille epätyypilliseen dityppioksidipäästöön. Dityppioksidin muodostuminen liittyy havumetsävyöhykkeessä jäisen ja sulavan maan olosuhteisiin, mutta talvipäästöjen varsinaisten syiden selvittäminen vaatii vielä tutkimustyötä. Keski-Euroopassa talvipäästöjä ei esiinny merkittävästi.

Laboratoriokokeessa havaittiin vastaavanlainen ilmiö kuin routakokeessa maastossa. Routakäsittelyn aikana dityppioksidin muodostus kohosi välittömästi humuskerroksen alapuolella. Talviaikainen tulva puolestaan kohotti maaperän dityppioksidin pitoisuutta tulvaa seuraavan kasvukauden aikana. Samanaikaisesti routa- ja tulvakäsittelyille alistetut maaperät olivat aktiivisia dityppioksidin tuottajia sekä talven että kasvukauden aikana. Tulvivassa maassa happipitoisuus oli alhainen, millä näyttäisi olevan vaikutusta eloperäisen aineksen hajotusketjun toimintaan.

Metaanin hapettajat (metanotrofit) reagoivat välittömästi tulvan laskettua. Humuskerroksen lähellä metaanipitoisuus laski nopeasti ilmakehän pitoisuutta (1.8 ppm) alemmaksi aina 0.2 ppm saakka. Sama ilmiö havaittiin myös tulvimattomissa maissa, mutta niissä metanotrofian voimistuminen näytti selkeämmin liittyvän lämpötilan nousuun myöhemmin kasvukauden aikana.

Typen ohella dityppioksidin muodostukseen maaperässä vaikuttaa veteen liukenevien hiiliyhdisteiden laatu, jossa havaittiin muutoksia routa- tai tulvakäsittelylle altistuneissa maaperissä. Tehdyt kokeet eivät kuitenkaan välttämättä ennusta talvitulvien aiheuttavan voimakkaita dityppioksidipäästöjä, mutta asia vaatii seurantaa, koska kivennäismaiden dityppioksidipäästöt oletetaan nolaksi metsämaan kasvihuonekaasujen raportoinneissa.

Juurten vahingoittuminen ja kuoleminen tuo mikrobeille uutta hajotettavaa, ja voi vaikuttaa myös puun typenottokykyyn. Routa ja tulva lisäävät dityppioksidin muodostusta. Jos talviset tulvat ja routasyklit yleistyvät, havumetsävyöhykkeen metsämaan dityppioksidipäästöt voivat kasvaa. Maaperän ilokaasupäästön kasvaminen voi heikentää metsän suorituskykyä ilmastonmuutoksen torjunnassa.

## Mykorritsoilla ei merkittävää vaikutusta pakkaskestävyyteen

Mykorritsarakenteen tiedetään olevan eduksi metsäpuiden taimille, koska se tehostaa kasvin ravinteidensaantia, lisää juuriston pinta-alaa ja ulottuvuutta sekä parantaa vastustuskykyä eräitä sienitauteja vastaan.

Mykorritsasienten itiöitä voidaan lisätä taimiin taimitarhalla. Toimenpiteellä varmistetaan mykorritsarakenteen muodostuminen. On myös esitetty, että joidenkin sienten muodostama mykorritsarakenne voisi edistää juurten pakkaskestävyyttä, mikä parantaisi taimien talvenkestävyyttä taimitarhoilla.

Tutkimuksessa selvitettiin mykorritsasienten kylmänkestävyyttä, ja mykorritsasieni-infektion ja ravinnepölytyksen vaikutusta männyn juurten ja versojen kylmänkestävyyteen. Lisäksi tutkittiin karaisukäsittelyn vaikutusta mykorritsallisten ja mykorritsattomien taimien pakkaskestävyyteen.

Mykorritsalliset männyn juuret kestivät kylmiä lämpötiloja melko hyvin. Karaisukäsittelyn jälkeen lyhyessä päivässä ja matalassa lämpötilassa kasvaneiden taimien mykorritsattomat ja mykorritsalliset juuret kestivät  $-6.8$  ja  $-7.5$  °C. Pitkässä päivässä ja korkeassa lämpötilassa kasvaneilla taimilla vastaavat lukemat olivat  $-9.8$  ja  $-8.9$  °C.

Mykorritsakäsittely paransi hieman pitkässä päivässä ja korkeassa lämpötilassa kasvaneiden, matalan ravintetason taimien juurten pakkaskestävyyttä. Sen sijaan lyhyessä päivässä ja matalassa lämpötilassa kasvaneilla taimilla mykorritsalla ei ollut vaikutusta juurten pakkaskestävyyteen.

Lyhyessä päivässä ja matalassa lämpötilassa kasvaneiden taimien neulaset olivat kestävämpiä kuin pitkässä päivässä ja korkeassa lämpötilassa kasvaneiden taimien neulaset. Ravinnepölytyksellä ei ollut vaikutusta juurten tai neulasten pakkaskestävyyteen. Mykorritsasienten kylmänkestävyyttä käsittelevien tulosten analysointi on kesken. Alustavien tulosten perusteella karaisukäsittely vaikutti taimien kylmänkestävyyteen.

Tutkimustulosten perusteella mykorritsakäsittelyllä ei näyttäisi olevan suurta vaikutusta juurten kylmänkestävyyteen ainakaan, mikäli taimella on muutoin saatavissa riittävästi ravinteita.

## Juurten sähköiset ja hydrauliset ominaisuudet muuttuvat pakkasvaurioiden seurauksena



Kuva: Anna Korhonen

Tutkimuksessa kehitettiin juurten sähköisiin ja hydraulisiin ominaisuuksiin perustuva menetelmä, jolla voidaan seurata juuristovaurioiden aiheuttamaa juurten kasvua ja toiminnan muuttumista.

Juurten impedanssispektroskopian (EIS) kehitystyössä oli kaksi päätavoitetta: 1) Nesteviljelyssä kasvatettujen pajujen juuristomittaukset, sähkömallin kehittäminen ja mallin parametrien vertailu juuripinta-alan kanssa. 2) Perliittissä kasvatettujen, mykorritsallisten (*Hebeloma* sp. ja *Suillus luteus*) ja mykorritsattomien männyn taimien juuristomittaukset, spektrianalyysit, sekä karaisukäsittelyn ja pakkasvaurioiden vaikutusten selvittäminen. Juurten hydraulisen johtavuuden mittaamenetelmän (HPFM) kehitystyön tavoitteena oli selvittää, miten hydraulinen johtokyky muuttuu pakkasvaurioiden seurauksena.

Tulosten perusteella juuripinta-alalla oli vaikutusta EIS-menetelmällä laskettuihin tunnuksiin. Juuriston impedanssispektreissä havaittiin myös muutoksia pakkasvaurioiden, karaistumisen ja sieni-infektion seurauksena. Juurten hydraulinen johtokyky kasvoi jo suhteellisen lievän ja lyhytaikaisen pakkasaltistuksen seurauksena. Pakkaskäsiteltyjen taimien lisääntynyt johtokyky kontrollitaimiin

verrattuna indikoi juurten vaurioitumista.

Tutkimustuloksia voidaan hyödyntää talvi- ja pakkasvarastoitujen taimien juuriston kunnon mittaamisessa. Tietoa tarvitaan, jotta voidaan tuottaa laadukasta taimimateriaalia koko kasvukauden jatkuviin istutuksiin.

Menetelmäkehityksestä ja juursitotutkimuksesta löytyy lisätietoa [Juuristolaboratorion www-sivuilta](http://www.sivuilla).

Kirjoittajat: *Tapani Repo, Jukka Alm, Anna Korhonen, Marja Roitto ja Sirkka Sutinen*

- Hankkeen vetäjä: vanhempi tutkija [Tapani Repo](#)
- Muut tutkijat: Arlena Brosinsky, Monica Calvo-Polanco, Yang Cao, Masako Dannoura, Leena Finér, Saori Fujii, Jaakko Heinonen, Helvi Heinonen-Tanski, Yasuhiro Hirano, Takuo Hishi, Tuula Jyske, Yoichi Kanazawa, Ekaterina Kapitsa, Yuji Kominami, Raija Laiho, Aurore Lavigné, Tarja Lehto, Lauri Leinonen, Naoki Makita, Marja Maljanen, Markku Manner, Pertti Martikainen, Mizoguchi, T., Harri Mäkinen, Kyotaro Noguchi, Pekka Nöjd, Mizue Ohashi, Harry Ozier-Lafontain, Marjo Palviainen, Paavo Pelkonen, Heli Peltola, Aija Ryyppö, Raimo Silvennoinen, Seija Sirkkiä, Ekaterina Shorohova, Ilkka Vanha-Majamaa, Ai-Fang Wang ja Janusz Zwiazek.
- Hanke 3489: [Ilmastomuutos ja juuret: Roudan ja tulvan vaikutus puiden kasvuun](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036198>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

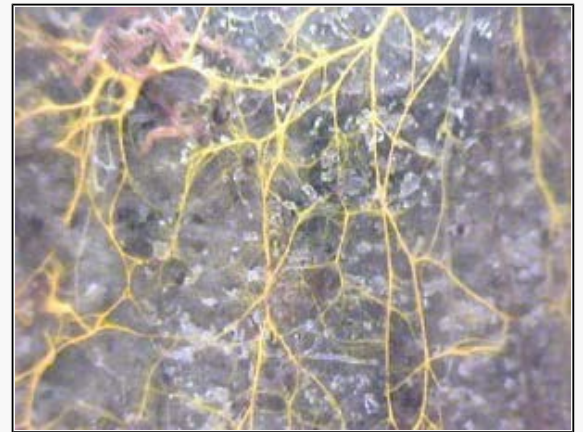
Loppuraportti

Raportin sisältö

## Kangasmaiden juuristosysteemi reagoi kasvuympäristön muutoksiin

Metsäpuiden ja muiden metsäkasvien hienojuuret uusiutuvat jatkuvasti ja muodostavat merkittävän, jopa maanpäällistä kariketuotantoa suuremman hiilivirran maahan. Valtakunnallisia hiilitaseita laskettaessa tämän hiilivuon suuruus tulee huomioida samoin kuin sen mahdolliset muutokset tulevaisuudessa ja metsien ravinteisuuden muuttuessa.

Ennustettu keskilämpötilan kohoaminen pidentää kasvukautta, lämmittää maaperää ja nopeuttaa ravinteiden mineralisaatiota ellei veden saatavuus ole rajoittava tekijä. Kasvuolosuhteiden muutokset vaikuttavat todennäköisesti positiivisesti maanpäällisen ja maanalaisen karikkeen määrään, mikä lisää myös hiilen virtaa maahan. Maanpäällisten ja maanalaisten karikevirtojen suhteet saattavat kuitenkin muuttua, millä voi maahengityksen muutosten lisäksi olla merkitystä siihen, kuinka paljon hiiltä lopulta varastoituu vaikeasti hajoaviin ja pitkäikäisiin hiiliyhdisteisiin.



Kuva: Heljä-Sisko Helmisaari

## Maaperän lämmitys kasvattaa hienojuuria ja mykorritsoja syvemmälle maahan ja nopeuttaa niiden uusiutumista

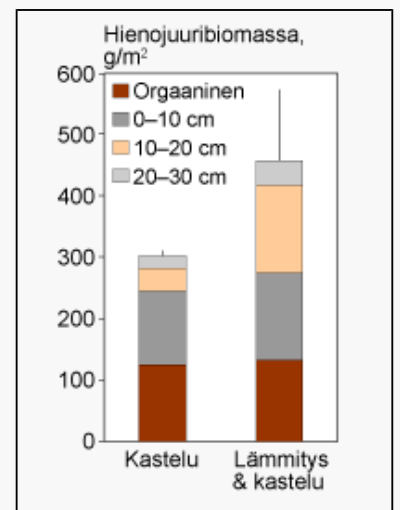
Pitkäaikaisista maastokokeista saadaan arvokasta tietoa metsäekosysteemin vasteesta hitaasti tapahtuvaan ilmaston muutokseen. Pohjois-Ruotsissa sijaitseva Ruotsin maatalousyliopiston (SLU) maaperän lämmitys- ja lannoituskoee on ainutlaatuinen boreaalisella vyöhykkeellä.

Maastokokeen lannoitus ravinneliuksella aloitettiin vuonna 1987 ja maaperän lämmitys vuonna 1995. Seurasimme kolmen vuoden ajan (v. 2008–2010) maaperän lämmityksen ja lannoituksen vaikutusta kuusen hienojuurten, mykorritsallisten lyhytjuurien sekä mykorritsasienten ulkoisen rihmaston biomassa ja tuotantoon. Kokeessa puiden neulas- ja hienojuuribiomassa lisääntyivät lannoituksen jälkeen samassa suhteessa, mutta lämmitetyillä koealoilla hienojuuribiomassan määrä suhteessa neulasmassa kasvoi.

Maaperän lämpötilan kohottaminen (+5 °C) lisäsi hienojuurten ja mykorritsallisten lyhytjuurien määrää syvemmissä kivennäismaakerroksissa verrattuna lämmittämättömiin koealoihin (Kuva 1). Tämä parantaa puun ravinteiden- ja vedenottomahdollisuuksia. Myös mykorritsojen ulkoisen sienirihmaston tuotanto lisääntyi jonkin verran.

Elinikäanalyysin mukaan sekä lämmitys että lannoitus lyhensivät hienojuurten elinikää. Lämmitys ja lannoitus yhdessä vaikuttivat vielä voimakkaammin: hienojuurten elinikä oli noin vuosi, kun vertailualueilla juuret elivät keskimäärin kaksi vuotta.

Hienojuurten eliniän ja biomassojen avulla arvioitiin vuotuinen maanalainen kariketuotanto (Kuva 2), jota verrattiin puiden maanpäälliseen kariketuotantoon. Sekä lämmitys että lannoitus lisäsivät maanalaisen



Kuva 1. Hienojuuribiomassa (g/m<sup>2</sup>) eri metsämaakerroksissa Pohjois-Ruotsin kokeella 15 vuoden lämmityskäsittelyn jälkeen.

kariketuotannon osuutta. Lämmitettyjen ja lannoitettujen koealojen vuotuinen kokonaiskariketuotanto oli lähes kolminkertainen vertailukäsittelyyn nähden.

Maan lämpeneminen lisäsi siis hiilen virtaa maahan hienojuurten nopeutuneen uusiutumisen ja lisääntyneen kariketuotannon kautta.

## Kuusen hienojuurten ravinteiden otossa eroja eri ilmasto-oloissa

Metsäpuittemme menestyminen vähäravinteisessa maaperässä ja ankarassa ilmastossa, jossa on lyhyt kasvukausi, edellyttää tehokkaan juuriston kasvattamista ravinteiden ja veden ottoa varten. Ilmasto ja maaperä vaikuttavat siihen, millaiseksi juuristo muodostuu ja kuinka nopeasti se uusiutuu.

Juuriston ravinteita ja vettä ottavat ohuimmat juuret, hienojuuret, ovat havupuillamme mykorrhizallisia. Ektomykorrhizasieni kasvaa hienojuurten pienten juurenkärkien ympärillä sekä juuren kuorikerroksen soluväleissä. Mykorrhizasieni kasvattaa maahan sienirihmastoja, joka lisää juurten pinta-alaa.

Puu voi lisätä ravinteiden ottoa kasvattamalla hienojuuria ja sienirihmastoja laajemmalle, muokkaamalla ektomykorrhizallisten lyhytjuurten morfologiaa ja muuttamalla sienilajistoa. Hienojuurten ravinteidenottostrategiat kuvastavat samalla sopeutumista muuttuvaan ilmastoon.

Tutkimme kuusen hienojuurten ravinteidenottostrategioita ilmasto- ja kasvupaikkagradienilla. Tutkimus tehtiin 12 kuusikossa, joista viisi oli Suomessa, kaksi Virossa ja viisi Saksassa. Suomesta ja Virossa kerätyissä näytteissä kaikki lyhytjuuret olivat ektomykorrhizallisia, mutta Saksassa viisi prosenttia lyhytjuurista ei ollut mykorrhizasientien kolonisoimia.

### Pohjoisessa enemmän ektomykorrhitsoja puuston pohjapinta-alaa kohti

Ravinteita ottavien sienijuurellisten lyhytjuurten biomassa oli 13 kiloa suurempi puuston pohjapinta-alan neliometriä kohti, kun siirryttiin Etelä-Saksasta 10 leveysastetta pohjoisemmaksi Etelä-Suomeen. Vastaava muutos oli paljon suurempi, 45 kg pohjapinta-alan neliometriä kohti, kun siirryttiin 10 leveysastetta Etelä-Suomesta Pohjois-Suomeen.

Yksittäisellä puulla oli 4–26 miljoonaa ektomykorrhizallista juurenkärkeä. Niiden lukumäärä puuta kohti ei eronnut merkittävästi eri metsiköissä. Puukohtaiset tulokset eivät ole kuitenkaan vertailukelpoisia, koska pohjoisissa metsissä puut ovat pienempiä. Kun tulokset laskettiin pohjapinta-alaa kohti, erot olivat selviä. Pohjoisissa metsissä (Suomi) oli 4.5–11 kertaa enemmän lyhytjuuria pohjapinta-alaa kohti, niiden rakenne oli tiheämpää ja ne olivat kaksi kertaa pitempiä kuin Etelä-Saksan metsissä.

Ektomykorrhitsojen biomassaosuus koko hienojuuribiomassasta lisääntyi etelästä pohjoiseen (Flossenbürg, Saksa: 6 %–Kivalo 36 %) ja myös ektomykorrhitsojen ravinteidenottopinta-ala lisääntyi etelästä pohjoiseen. Yhden kuusen ektomykorrhitsojen pinta-ala oli Suomessa keskimäärin 33 neliometriä. Etelässä oli enemmän sellaisia ektomykorrhizalajeja, jotka muodostavat pitemmälle ulottuvia sienirihmastoja, minkä ansiosta etelän ektomykorrhitsat olivat tehokkaampia ravinteiden otossa.

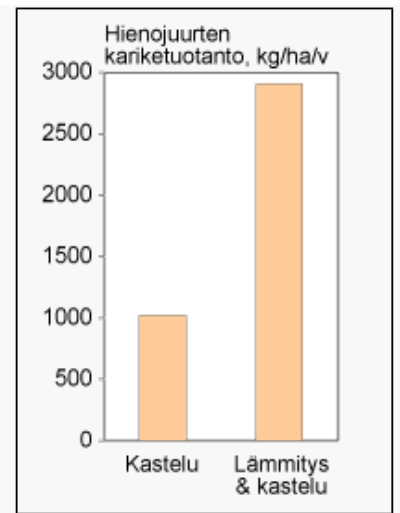
### Pohjoisten puiden hienojuuret sopeutuvat kylmään ilmastoon ja vähäiseen ravinteiden saatavuuteen

Tutkimustulosten perustella hienojuurten sopeutumisstrategiat ovat erilaisia boreaalisen ja lauhkean vyöhykkeen kuusimetsissä. Pohjoisessa puiden hienojuuret sopeutuvat kylmään ilmastoon ja vähäiseen ravinteiden saatavuuteen lisäämällä ektomykorrhitsojen biomassa, pituutta ja lukumäärää suhteessa metsikkötunnuksiin. Pohjoisessa puut allokoivat suhteellisesti enemmän biomassa maanalaisiin osiinsa kuin etelässä kasvua rajoittavan kasvutekijän, etenkin typen, saannin turvaamiseksi.

Pohjoisessa puut kasvattavat ja levittävät sienijuurensa laajalle, kun taas etelässä sienijuuria on vähemmän, mutta ne ovat tehokkaampia morfologialtaan ja sienilajistoltaan. Tämä tarkoittaa samalla sitä, että lämpimämmässä ilmastossa puusto käyttää suhteellisesti enemmän hiilihydraatteja maanpäällisen biomassan kasvattamiseen, ellei ravinteiden ja veden saatavuus rajoita.

## Hienojuurten sisältämä hiili voi olla vanhempaa kuin juuret

Hienojuurten on oletettu käyttävän kasvuunsa äskettäin ilmakehästä yhteytettyä hiiltä. Radiohiilitutkimuksemme osoittivat kuitenkin, että juurten selluloosan hiili oli 3–12 vuotta vanhaa ja useissa tapauksissa jopa 10 vuotta



Kuva 2. Kuusen hienojuurten vuotuinen maanalainen kariketuotanto (kg/ha).

vanhempaa kuin hienojuurten ikä. Tämä osoitti juurten voivan käyttää varastoitua ja maaperästä otettua hiiltä selluloosan muodostamiseen.

Hienojuurten hiili oli 1–5 vuotta vanhempaa kivennäismaassa kuin maaperän orgaanisessa pintakerroksessa, ja paksimmat hienojuuret (läpimitta 1.5–2 mm) olivat 2–3 vuotta vanhempia kuin ohuimmat, mykorritsalliset hienojuuret (läpimitta alle 0.5 mm). Hienojuurten hiili oli vanhempaa Suomen karummilla kasvupaikoilla kuin Viron eteläisemmällä ja viljavammalla kasvupaikalla.

## Puulaji vaikuttaa metsämaan hiilen ja typen virtoihin enemmän lämpimässä ilmastossa: maaperäeliöstö avainasemassa

Fennoskandian yleisimmät puulajit, kuusi ja mänty, lisäävät joidenkin aiempien tutkimusten mukaan kasvupaikkansa hiilen ja typen määriä enemmän kuin koivu. Tutkimme orgaanisen aineen hajoituksessa tapahtuvaa hiilen vapautumista ilmakehään (maahengitystä) ja mineralisaatiota (hiilen ja typen vapautumista maaperään hajoavasta karikkeesta) kahdella puulajikokeella, joista toinen sijaitsi Etelä-Ruotsissa ja toinen Pohjois-Suomessa. Molemmat kokeet oli perustettu yli 50 vuotta sitten.

Etelä-Ruotsissa maaperässä oli eniten hiiltä ja typpeä kuusikossa ja vähiten koivikossa. Myös Pohjois-Suomessa hiilen ja typen määrät olivat merkittävästi suuremmat kuusikossa kuin koivikossa. Etelä-Ruotsissa hiilen päivittäinen mineralisaatio oli nopeinta koivikossa. Koivikossa oli myös suuri kastemato populaatio, 120 yksilöä neliometrillä, joka todennäköisesti osaltaan selittää hiilen mineralisaationopeutta, sillä kastematojen muokkaama karike hajoaa helpommin. Pohjois-Suomessa hiilen ja typen mineralisaatio oli nopeampaa kuusikossa ja koivikossa kuin männikössä. Syynä saattoi olla aluskasvillisuuden erot, etenkin männikön runsas seinäsammalkasvusto, joka hidasti orgaanisen aineen hajotusta.

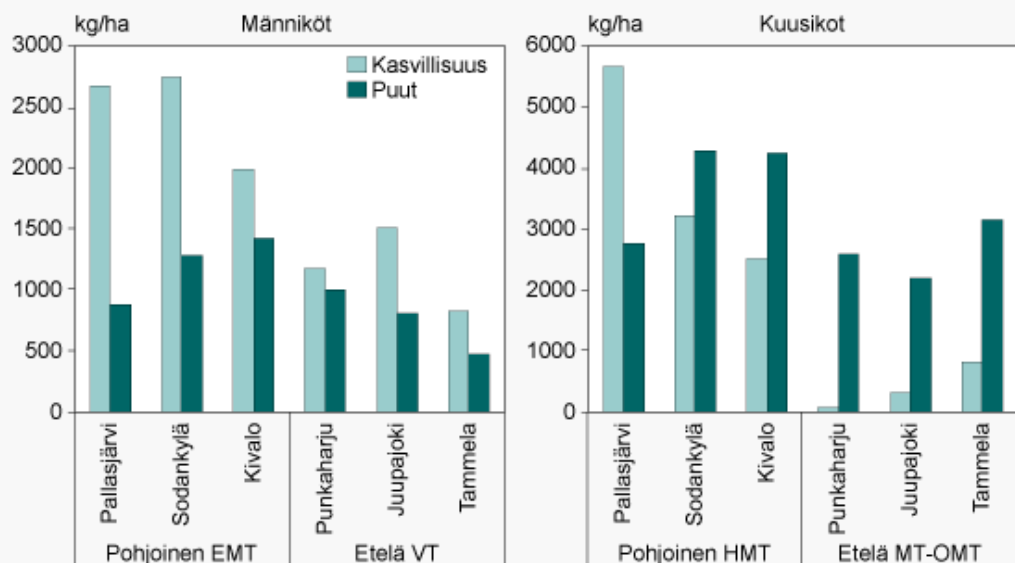
Etelä-Ruotsissa typen nettomineralisaatiomäärässä (80–90 kg typpeä hehtaarilla vuodessa) eri puulajimetsiköiden välillä ei ollut eroja, mutta nitrifikaatio (nitraatin muodostus) oli suurinta koivikossa. Pohjois-Suomessa typen nettomineralisaatio oli vähäistä (< 4 kg typpeä hehtaarilla vuodessa) eikä puulaji vaikuttanut siihen.

Eri ilmastossa sijaitsevien kasvupaikkojen suurin ero oli siinä, että Etelä-Ruotsin koivikko paransi maata, ts. maan orgaanisen aineen hajotus oli nopeampaa koivun lehtikarikkeen lisäessä kastemato populaatiota. Samaa ei kuitenkaan tapahtunut Pohjois-Suomen koivikossa, jossa ilmasto rajoittaa kastematojen esiintymistä.

## Maavarsilla ja juurilla on tärkeä merkitys metsämaan hiilivarastossa

Aluskasvillisuuden maanalaiset osat ovat oleellinen osa hiilen ja ravinteiden kiertoa metsämaassa. Tutkimme aluskasvillisuuden maavarsien ja hienojuurien sekä puiden hienojuurien ja läpimitaltaan 2–5 mm paksujen juurien biomassaa orgaanisessa kerroksessa ravinteisuus- ja ilmastogradienteilla. Aineisto kerättiin 12 koealalta, joista puolet oli kuusikoita ja puolet männiköitä. Koealat sijaitsevat Etelä- ja Pohjois-Suomessa.

Aluskasvillisuuden kokonaisbiomassasta 40–60 % oli maan alla. Sekä männiköissä että kuusikoissa aluskasvillisuus allokoiti enemmän biomassaa maan alle pohjoisessa kuin etelässä (Kuva 3). Etelä-Suomessa aluskasvillisuuden maanalainen biomassa orgaanisessa kerroksessa lisääntyi kasvupaikan ravinteisuustason pienessä eli oli suurempi puolukkatyyppin (VT) männiköissä kuin lehtomaisen tai tuoreen kankaan (OMT-MT) kuusikoissa.



Kuva 3. Aluskasvillisuuden ja puiden maanalainen biomassa (maavarret/juuret) orgaanisessa kerroksessa a) mäntykoealoilla ja b) kuusikoealoilla. Metsätyypit: EMT = *Empetrum-Myrtillus*-tyyppi, VT = *Vaccinium*-tyyppi, HMT = *Hylocomium-Myrtillus*-tyyppi, MT = *Myrtillus*-tyyppi, OMT = *Oxalis-Myrtillus*-tyyppi.

Pohjoisessa metsikön ikä vaikutti ravinteisuustasoa enemmän aluskasvillisuuden biomassan määrään. Männiköiden orgaanisessa kerroksessa oli enemmän aluskasvillisuuden maavarsia ja juuria kuin puiden juuria sekä etelässä että pohjoisessa. Kuusikoissa suhde oli pääsääntöisesti toisin päin, niiden orgaanisessa kerroksessa oli enemmän puiden juuria kuin aluskasvillisuuden maanalaisia osia.

Aluskasvillisuuden maavarret ja juuret sekä puiden läpimitaltaan alle 5 mm juuret selittivät pohjoisessa 7–24 % ja etelässä 1–4 % orgaanisen kerroksen kokonaisbiomassasta. Juurten ja maavarsien kasvulla saattaa siten olla huomattava vaikutus orgaanisen kerroksen hiilimäärän vaihtelulle vuosien välillä etenkin Pohjois-Suomessa.

## Tuloksia käytetään kasvihuonekaasutaseiden raportoinnissa

Tuloksia hyödynnetään metsien hiilitaseiden kansallisessa ja globaalissa mallintamisessa ja raportoitaessa Suomen kasvihuonekaasujen taseita. Kansallisessa kasvihuonekaasutaseiden raportoinnissa on tähän saakka käytetty samaa juurten uusiutumiskerrointa eri puulajeille ja kasvupaikoille. Tulostemme avulla tätä voidaan nyt tarkentaa, ja samalla tehdä ennusteita ilmaston muuttumisen vaikutuksista.

Hiilen varastoituminen maaperään riippuu tasapainosta varsinkin maanpäällisten ja maanalaisten karikevirtojen ja orgaanisen aineen hajotuksen välillä, ja siihen vaikuttaa myös liukoisen orgaanisen hiilen huuhtoutuminen. Maaperän eliöstö on keskeinen näissä prosesseissa, ja ilmasto vaikuttaakin maaperän hiilen ja typen prosesseihin paitsi puulajin, myös maaperäeliöstön elinolosuhteiden kautta. Lämpimämmässä ilmastossa ja ravinteikkaammassa maaperässä hiiltä varastoituu enemmän maaperään suuremman karikesadon myötä, mutta lehtipuumetsiköissä vähemmän kuin havupuumetsiköissä.

Lämpimämmässä ilmastossa puusto käyttää suhteellisesti enemmän hiilihydraatteja maanpäällisen biomassan kasvattamiseen, ellei ravinteiden ja veden saatavuus rajoita. Mikäli ilmasto lämpenee, mutta ravinteiden saatavuus rajoittaa, juurten kasvu ja maanalainen kariketuotanto lisääntyvät suhteessa maanpäälliseen kasvuun. Tällöin puut ja aluskasvillisuus allokoivat suhteellisesti enemmän biomassaa maanalaisiin osiinsa kasvua rajoittavan kasvutekijän, tärkeimpänä typpi, saannin turvaamiseksi. Tämä voi osaltaan vaikuttaa takaisinkytkentänä maanpäällisen kasvun pienenemiseen. Ilmaston lämmitessä oleelliseksi asiaksi muodostuukin ravinteiden saatavuus.

Kirjoittajat: *Heljä-Sisko Helmisaari, Jaana Leppälampi-Kujansuu, Maija Salemaa ja Shambhu Sah*

- Hankkeen vetäjä: varttunut tutkija [Maija Salemaa](#)
- Muut tutkijat: Heljä-Sisko Helmisaari (Helsingin yliopistossa 1.6.2010 lähtien), Jaana Leppälampi-Kujansuu (Helsingin yliopisto), Pekka Nöjd ja Shambhu Sah.
- Hanke 3528: [Hiilen ja ravinteiden dynamiikka kangasmailla ympäristötekijöiden muuttuessa](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[← Takaisin raportin sisältöön](#)

[↑ Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036199>

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

### Soiden kasvihuonekaasutaseet muuttuvat ilmaston muuttuessa

Pohjoisten soiden osuus maapallon maapinta-alasta on vain kolme prosenttia, mutta niihin on varastoituneena kolmasosa kaikesta maaperän hiilestä, ja se vastaa noin puolta ilmakehässä olevasta hiilestä. Suomen luonnontilaiset suot (yli 4 miljoonaa hehtaaria) ovat merkittävä hiilidioksidinielu. Niihin on arvioitu kertyvän hiiltä vuosittain noin 1,3 Tg (=Mt). Toisaalta luonnontilaiset suot ovat hapettoman hajotuksen takia tärkein luontainen ilmakehän metaanin lähde. Metaani on hiilidioksidia 25-kertaa voimakkaampi kasvihuonekaasu, minkä vuoksi luonnontilaiset suot lämmittävät ilmastoa.

Lämpötila ja pohjaveden taso vaikuttavat soiden hiilidioksi- ja metaanivirtoihin. Arvioiden mukaan kolmen asteen lämpötilan nousu pohjoisilla alueilla lisää haiduntua siten, että soiden kesäaikainen pohjavesipinta olisi 10–20 cm nykyistä alempana. Tällaisten muutosten oletetaan vaikuttavan typen mineralisaatioon ja tätä kautta kasvien käytettävissä olevan typen määrään. Ajan oloon alkuperäinen suolajisto voi kokonaan korvautua muuttuneisiin oloihin sopeutuneilla lajeilla.

Metsäojituksella oletetaan olevan suoekosysteemien kasvillisuuteen, mikrobitoimintaan ja sitä kautta ainekiertoihin samantyyppisiä kuivatusvaikutuksia kuin ilmaston lämpenemisellä. Tutkimuksessa verrattiin luonnonsoiden ja ojitettujen soiden hiilitaseita ja niihin vaikuttavia tekijöitä eri ilmastoalueilla sekä pienimuotoisissa lämmityskokeissa erilaisilla suoalueilla.

### Luonnontilaisen suon kariketuotos ja mikrobiyhteisöjen toiminta muuttuvat lämpenemisen ja kuivumisen seurauksena

Tulostemme mukaan pohjaveden tason aleneminen **pohjoisella aapasuolla** noin 15 cm:llä lisäsi mikrobien toimintaa ja orgaanisen aineen hajoamista, minkä seurauksena hiilidioksidivuoto lisääntyi kolminkertaiseksi. Toisaalta maanpäällisen kariketuotoksen lisääntyessä maahan suuntautuva hiilivuoto kasvoi. Muutokset näkyivät myös maamikrobikoostumuksessa siten, että suon kuivuessa sienten osuus kasvoi suhteessa bakteereihin. Suon kuivumisen myötä sienten määrä näyttäisi lisääntyvän, ja tietyt sienilajit saattavat erityisesti hyötyä. Aktinobakteerilajisto ("sädesienet") ei näyttäisi olevan erityisen herkkä suon kuivumiselle. Vähäisenkin suon kuivuminen vaikutti selvästi sekä metaania tuottavien arkkien että metaania hapettavien bakteerien yhteisöihin ja niiden aktiivisuuteen: sekä maastossa mitatut metaanipäästöt että laboratoriossa mitattu metaanintuottopotentiaali pienenevät olennaisesti.

**Eteläisellä kohosuolla** vähäisenkin vedenpinnan lasku aiheutti muutoksia mikrobiyhteisöjen rakenteeseen, ja muutos oli näkyvämpi runsasravinteisella ja märemmällä suotyypillä. Vaikka etenkin sieniyhteisö reagoi vahvasti jo vähäisiin muutoksiin, muutokset voivat vaihdella eri suotyypeillä. Kuivumisen aiheuttama muutos kasvillisuudessa ja sen tuottaman karikkeen laadussa vaikutti lopulta enemmän sekä hajottajayhteisöiden koostumukseen että hajotuksen aktiivisuuteen kuin esimerkiksi kasvupaikan ravinteisuus. Kuivumisen myötä kariketuotanto lisääntyi ja hitaasti hajoavaa kariketta muodostui enemmän. Varsinkin karuilla kasvupaikoilla kariketuotos oli pitkällä aikavälillä suurempi kuin hajotus. Kuivumisen ja kasvillisuusmuutosten myötä pintaturpeen lämpötila oli selvästi alhaisempi verrattuna luonnontilaiseen suohon.

Tutkimustulostemme mukaan kuivumisen aiheuttamat muutokset sekä aerobisissa että anaerobisissa mikrobiyhteisöissä ja niiden aktiivisuudessa ovat märillä ja rehevillä soilla suurempia kuin kuivemmillä ja karummilla. Jos ilmastomuutos alentaa soiden kesäaikaista vedenpintaa, märkien soiden metaanipäästöt



Kaasumittauksia Pallasjärvellä. Kuva Niko Silvan.

pienenevät huomattavasti. Tällä voi olla merkittävä ilmaston lämpenemistä hidastava vaikutus. Vaikka hiilidioksidipäästöt turpeesta kasvavat lämpenemisen seurauksena, ainakin karut suot pysyvät hiilen nieluina kasvillisuuden lisääntyvän kariketuoton vuoksi.

## Lämmityksen ja kuivatuksen vaikutukset kasvihuonekaasutaseisiin havaittiin myös kammiokokeissa

Kesien 2008–2010 aikana tutkittiin lämmityksen ja vedenpinnan tason vaikutuksia hiilidioksidin, metaanin ja typpioksiduulin taseisiin kolmella keskiravinteisella, oligotrofisella saranevalla. Kasvihuonekaasutaseita mitattiin luonnontilaisella alueilla ja alueilla, joissa pohjaveden pintaa oli alennettu 15 cm tai 30 cm. Lämmitysvaikutus saatiin aikaan avokammioilla. Kammiot nostivat tehoisaa lämpösomaa (+5 °C:n kynnyslämpötila) puuston määrästä riippuen 100–108 d.d.

Tutkimustulostemme mukaan soiden hiilen sidonta laski lämpenemisen ja kuivumisen seurauksena. Kuivumisella oli hiilitaseisiin merkittävämpi vaikutus kuin lämmityksellä. Kuivatus pienensi etenkin metaanin emissioita, mutta myös lämmityksellä oli pieni metaaniemissioita vähentävä vaikutus luonnontilaisilla mittauspisteillä. Käsittelyillä ei ollut vaikutusta typpioksiduulin emissioihin.

## Kasvihuonekaasulaskelmiin tarvitaan koko maan kattavaa tietoa ojituksen vaikutuksista kasvihuonekaasupäästöihin eri suotyypeillä

Metsäojitus kiihdyttää suon pintaosissa tapahtuvaa hapellista hajotustoimintaa. Toisaalta ojitus muuttaa myös kasvillisuutta ja sen kariketuotoksen määrää ja laatua. Ojituksen kokonaisvaikutus turvemaan hiilitaseeseen riippuukin muutoksesta kariketuotoksen ja karikkeen ja turpeen hajotuksen suhteessa.

Valtakunnan metsien kahdeksannen inventoinnin (VMI 8) pysyviltä koealoilta valittiin 70 koealaa, joilta mitattiin kasvihuonekaasutaseita vuosina 2007 ja 2008. Tavoitteena oli tuottaa kaikille metsänkasvatuskelpoisille turvekangastyypeille ja koko Suomen alueelle yleistämiskelpoiset arviot metsäojitettujen soiden hiilidioksidi-, metaani- ja dityppioksidivirroista.

### Hiilidioksidituotanto riippuu suon ravinteisuudesta

Tulostemme mukaan hiilidioksidipäästö on suurin rehevillä ojitetuilla soilla ja vähenee kasvupaikan muuttuessa karummaksi (kuva 1). Vaihtelu on kuitenkin suurta kunkin kasvupaikkatyyppin sisällä. Runsas puuston määrä ja syvällä oleva pohjavesipinta lisäävät maahengitystä.

Maaperän heterotrofisen hajotushengityksen päästöt ovat koko maan keskiarvoiksi laskettuna suunnilleen samaa tasoa kuin nykyiset, kasvihuonekaasuraportoinnissa käytettävät metsäojitettujen soiden päästöarviot, jotka perustuvat alueellisesti paljon suppeampaan aineistoon.

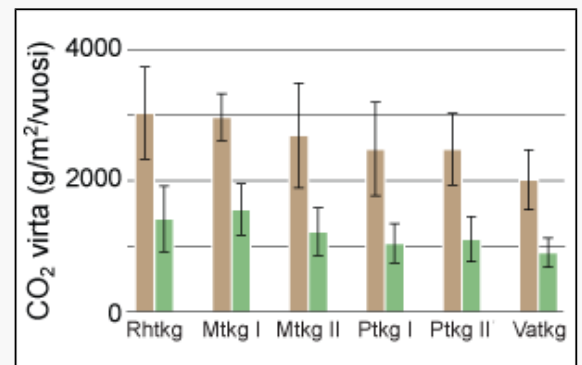
### Metaanipäästöt pienenevät ojituksen jälkeen

Ojitus alentaa pohjavesipintaa ja kasvattaa hapellisen pintaturverroksen paksuutta. Kun pintakerroksen happipitoisuus kasvaa, metaania tuottavat mikrobit eivät menesty. Siten ojitus pienentää metaanipäästöjä, ja turvekangasasteella suot kääntyvät jopa metaaninieluiksi. Arviomme mukaan ojikko- ja muuttumavaiheessa olevat ojitusaluet ovat vähäisiä metaanin lähteitä (1,16 g/m<sup>2</sup>/v), ja turvekangasasteelle kuivuneet kohteet olivat pieniä metaaninielua (0,28 g/m<sup>2</sup>/v).

Koealoilta mitatut dityppioksidipäästöt olivat vähäisiä ja pienenevät ravinteikkailta ruohoturvekankailta (0,185 g/m<sup>2</sup>/v) karuille varputurvekankaille (0,029 g/m<sup>2</sup>/v). Aiemmin maatalouskäytössä olleilla turvemailla päästöt voivat olla huomattavasti suurempia. Dityppioksidi on voimakas kasvihuonekaasu, jota voi syntyä maaperässä typen hapetukseen ja pelkistykseen liittyvissä prosesseissa.

### Kariketuotoksella ja -hajotuksella on tärkeä merkitys ojitettujen soiden hiilitaseisiin

Vaikka karikkeiden hajotusnopeus lisääntyi ojituksen vaikutuksesta, pitemmällä aikavälillä suuret muutokset karikkeiden määrässä ja karikkeen laadussa johtivat siihen, että vaikeasti hajoavista karikkeista kerrostui huomattavasti enemmän orgaanista ainesta kuin vastaavalla luonnontilaisella kasvupaikalla. Tämä vuoksi ainakin karuilla kasvupaikkatyypeillä maaperä voi säilyä hiilen nieluna kuivumisen jälkeenkin, vaikka orgaanisen aineen hajotus lisääntyy.



Kuva 1. Kokonaismaahengitys (■) ja heterotrofinen hengitys (■) laskevat suon ravinteisuuden vähentyessä. Ptkg ja Vatkg ovat karuja ojitettuja soita, Mtkg ja Rhtkg ovat reheviä soita. Janat kuvaavat kasvupaikkojen sisäistä vaihtelua.

Kasvillisuuden muuttuminen esimerkiksi ilmastonmuutoksen tai maankäytön seurauksena on tärkeä turvemaan hiilidynamiikkaan vaikuttava tekijä. Kasvillisuusdynamiikka tuleekin sisällyttää malleihin, joilla pyritään arvioimaan ympäristömuutosten vaikutuksia turvemaan hiilen kiertoon.

### Arvioita ojitettujen soiden hiilitaseesta

Soiden hiilitaselaskelmat pohjautuvat maahengitysmittauksiin sekä arvioihin maahan tulevista hiilivirroista eli kasvillisuuden maanalaisesta ja maanpäällisestä kariketuotoksesta.

Karuilla ojitusalueilla (puolukkaturvekankaat ja sitä heikommat) maaperä on keskimäärin pieni hiilen nielu, jonka suuruus ei riipu lämpösummasta (kuva 2). Rehevillä ojitusalueilla (mustikkaturvekankaat ja paremmat) maaperä sen sijaan on hiilen lähde, erityisesti Etelä-Suomessa.

Välittömästi avohakkuun jälkeen ojitetun suon heterotrofinen maahengitys vähenee, joten hakkuu sinänsä ei juurikaan vähennä turvemaan hiilivarastoa. Koska avohakkuualoilla karikesyöte vähenee radikaalisti, turvemaata muuttuu hiilen nettolähteeksi, kunnes uusi kasvillisuus jälleen ylittää hajotuksessa poistuvan hiilen määrän.

Kasvava puusto on selkeä hiilinielu kaikilla ojitusalueilla, ja nykyisellään puuston hiilinielu on noin viisinkertainen vastaaviin luonnontilaisiin soihin verrattuna. Puustonielu on rehevillä turvekangastyypeillä selvästi suurempi kuin karuilla (kuva 3).

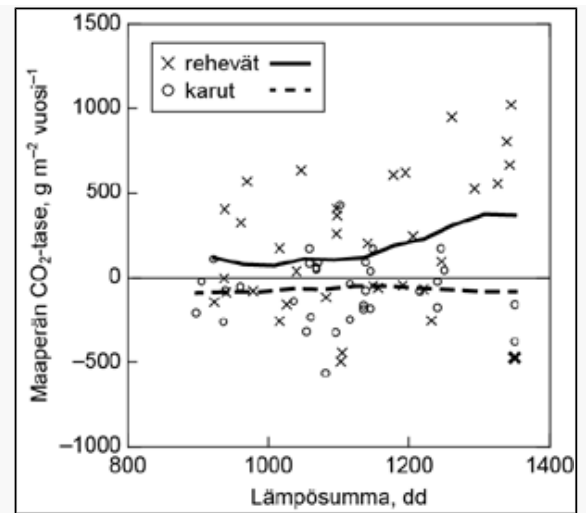
### Tulokset palvelevat kasvihuonekaasuraportointia ja soiden käytön ohjausta

Pohjoisten suoekosysteemien valtavien hiilivarantoihin kohdistuu globaalin lämpenemisen vuoksi suuria uhkatekijöitä. Siksi suoekosysteemien hiilitasemuutosten ja niihin vaikuttavien tekijöiden tutkimus ja seuranta on välttämätön. Suomessa VMI -koaloille on perustettu maaperän hiilivaraston pitkäaikaisen muutoksen seurantapisteen, joiden avulla havainnoidaan koko turvekerroksen ja aktiivisen pintaturvekerroksen paksuutta. Koaloilta saatuja tuloksia voidaan käyttää kansallisessa kasvihuonekaasuinventaariossa tai laskettaessa alueellisia kasvihuonekaasutaseita.

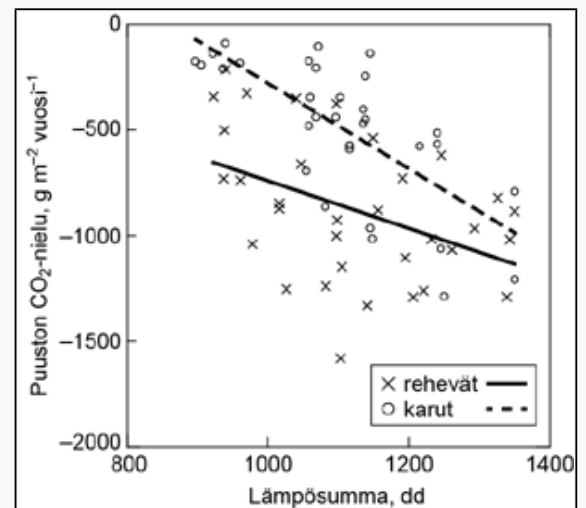
Karuilla ojitusalueilla metsänkasvatus näyttäisi olevan pitkälläkin aikavälillä ilmastollisesti kestävä. Rehevillä kasvupaikoilla ojitusalueiden hiilinielu on puuston kasvun varassa. Pitkällä aikavälillä tämä johtanee siihen, että nämä kasvupaikat muuttuvat hiilen nettolähteiksi ellei puuston sitoutunutta hiiltä pystytä jollain keinolla varastoimaan.

Kirjoittajat: *Timo Penttilä, Niko Silvan, Paavo Ojanen, Krista Peltoniemi ja Tytti Sarjala*

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Tytti Sarjala](#)
- Muut tutkijat: Jukka Alm, Tiina Badorek, Markus Hartman, Juha Heiskanen, Jukka Laine, Timo Penttilä, Pekka Pietiläinen, Niko Silvan, Riina Mäkelä ja Jaana Vuosku
- Hanke 3491: [Ilmastonmuutoksen vaikutukset turvemaiden hiilen ja typen kiertoon](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)



Kuva 2. Karujen ojitettujen soiden (o) maaperä on keskimäärin hiilen nielu, rehevämpien soiden (X) maaperä menettää hiiltä. Rehevillä soilla hiilihävikki kasvaa lämpösumman noustessa.



Kuva 3. Ojitusalueiden nykypuuston hiildioksidinielu on rehevillä soilla (X) suurempi kuin karuilla (o) ja kasvaa lämpösumman suuressa.

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

[MIL-kotisivu](#)

[Loppuraportti](#)

[Raportin sisältö](#)

### Skenaariolaskelmien mukaan Suomen metsät järeytyvät ja tihentyvät, ja hiilinielu kasvaa

Suomen metsäpinta-ala on 26 miljoonaa hehtaaria ja nykyinen puuston määrä 2,2 miljardia kuutiometriä. Puuston kasvu on lisääntynyt 1970-luvulta lähtien ja on nyt 104 miljoonaa kuutiota vuodessa. Myös puuston määrä on lisääntynyt, koska hakkuut ovat olleet pienempiä kuin kasvu.

Metsäpinta-alasta noin 82 % on taloudellisen toiminnan piirissä. Metsätalouden toimenpiteet, kuten metsän uudistaminen ja maanmuokkaus, taimikonhoito, harvennus- ja päätehakkuut, ojitus ja lannoitus, vaikuttavat merkittävästi siihen, millaisia tulevaisuuden metsät ovat.

Lämpenevällä ilmastolla on arvioitu olevan metsien kasvulle suotuisa, kasvua lisäävä vaikutus. Erityisesti

Pohjois-Suomessa metsän kasvun on ennustettu lisääntyvän voimakkaasti. Puuston hiilivarat lisääntyvät kuutiomäärän kasvaessa, ja erityisesti kivennäismaiden hiilivarasto lisääntyy läheisessä suhteessa puuston määrään.



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

### Metsien käytön ja ilmastomuutoksen vaikutuksia tutkittiin skenaarioiden avulla

Metsien käytön vaikutuksia puuston määrään ja rakenteeseen sekä hiilitaseeseen tutkittiin muutamien toisistaan poikkeavien puunkäytön skenaarioiden avulla. Lisäksi tarkasteltiin ilmastomuutoksen vaikutusta yhden skenaarion (IPCC A1B) avulla. Skenaarioita laadittaessa on hyödynnetty olemassa olevia puun käytön arvioita ja täydennetty niitä oletuksilla. Tarkasteluväli kattaa vuodet 2007–2040, joka on talouden ja globaalien muutostrendien näkökulmasta pitkä aika, mutta metsäluonnon muutosten kannalta lyhyt. Eri skenaarioiden toteutumisen todennäköisyyksiin ei oteta kantaa.

Hakkuista käytössä oli kolme skenaariota, jotka vastaavat vähäistä, voimakkaampaa ja maksimaalista puunkäyttöä (Taulukko 1). Alhaisen puunkäytön skenaariossa sekä ainespuun että energiapuun käyttö on vähäistä. Maltillisen puunkäytön skenaariossa kulutetaan ensimmäistä vaihtoehtoa enemmän sekä ainespuuta että energiapuuta. Suurimman kestävän kertymän skenaariossa metsiä hakataan täysimääräisesti kestävän kertymän mukaisesti. Laskelmat tehtiin sekä olettaen ilmasto-olosuhteitten säilyvän nykyisellään että ottaen huomioon IPCC:n A1B skenaarion ennustukset kohoavasta vuoden keskilämpötilasta ja sadannasta.

Puunkäyttöskenaario	Ainespuuhakkuut v. 2020	Energiapuunkäyttö * v. 2020
Alhainen puunkäyttö	43,6 milj.m <sup>3</sup>	18,0 milj.m <sup>3</sup>
Maltillinen puunkäyttö	56,6 milj.m <sup>3</sup>	25,5 milj.m <sup>3</sup>
Suurin kestävä kertymä	74,8 milj.m <sup>3</sup>	24,0 milj.m <sup>3</sup>

Taulukko 1. Puun käyttö kolmessa skenaariossa vuonna 2020. \*Sisältää myös kotitalouksien polttopuun käytön 5,5 milj.m<sup>3</sup>

### Kaikki skenaariot osoittavat puuvarantojen kasvavan

Suomen metsien puuvarannot kasvavat kaikissa skenaarioissa (Kuva 1). Samalla metsät

tihtentyvät ja ikääntyvät. Varsinkin, jos metsien käyttöaste on alhainen, puuvarannon kasvu nopeutuu entisestään: Kun laskelmiin otetaan mukaan ilmastonmuutoksen vaikutus, puustopääoman kehitys nopeutuu voimakkaasti ja nousee maksimissaan nykyisestä 2,2 miljardista yli kolmeen miljardiin kuutiometrin. Tällöin kuitenkin luonnonpoistuman osuus kasvaa, koska puustojen ikääntyessä myös puiden luontainen kuoleminen lisääntyy. Näin erityisesti skenaariossa, jossa metsäteollisuuden puunkäyttö on alhainen ja ilmastonmuutos kiihdyttää puuston kasvua. Nämä kehitystrendit lisäävät myrsky-, tauti- ja hyönteistuhoriskia sekä mahdollisesti myös metsäpalojen riskiä, kun kuolleen pystypuuston määrä kasvaa.

Hakkuukertymästä tulee nykyistä suurempi osa harvennusleimikoista (Kuva 2). Kaikissa skenaarioissa avohakkuiden ainespuukertymä laskee. Harvennushakkuiden osalta Alhaisen puunkäytön skenaario poikkeaa muista: Koska teollisuuden puunkäyttö laskee voimakkaasti, hakkuukertymä saadaan aluksi päätehakuilta. Muissa skenaarioissa harvennuspuun määrä kasvaa noin 60 % nykytasoon verrattuna.

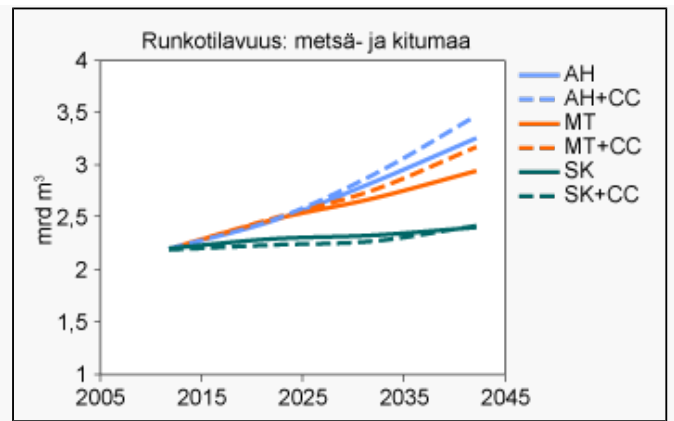
### Skenaariot osoittavat metsien säilyvän hiilen nieluina

Kaikissa skenaarioissa metsät ovat koko tarkastelujakson ajan hiilen nielu (Kuva 3). Suurimman kestävä kertymän skenaariossa metsien hiilinielu juuri ja juuri säilyy ja muissa skenaarioissa hiilinielu kasvaa.

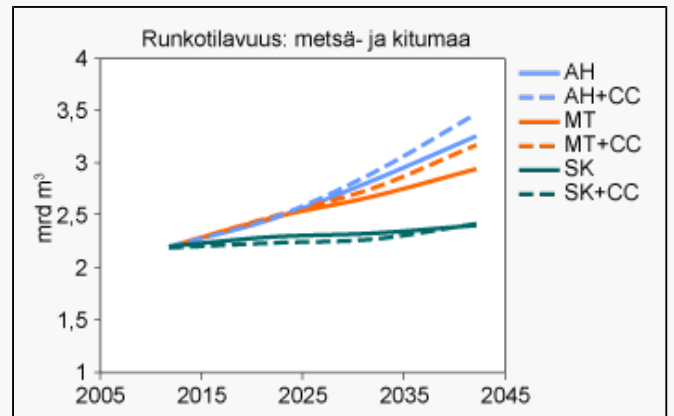
Käytettävissä olevan tiedon perusteella näyttää siltä, että Suomessa metsien kasvu ja kariketuotos lisääntyvät ilmaston lämmitessä enemmän kuin karikkeen hajotus. Ojitettujen soiden maaperä on tämänhetkisen arvion mukaan hiilen lähde ja säilyy sellaisena koko skenaariojakson, joskin lähde pienenee jakson loppua kohden. Ilmastonmuutos lisää yhtä aikaa sekä puuston kasvua ja karikkeen tuotosta ja hajotusta. Tulevaisuudessa ojitetut suot voivat muuttua jopa nieluksi, jos niiden puuston käyttö jää vähäiseksi.

Vuonna 2013 alkavalle Kioton seuraavalle velvoitekaudelle metsänielun laskentamenetelmäksi on sovittu vertailutasomenetelmä. Jos metsänielu on vertailutasoa suurempi, maa saa siitä hyvityksen. Silloin kun metsänielu on vertailutasoa pienempi, maa saa siitä päästörasitteen. Suomen vuotuisen nielun vertailutasoksi neuvotteluissa määritettiin 5,48 miljoonaa tonnia hiiltä. Vertailutaso ylitetään kaikissa skenaarioissa maksimaalisen hakkuutason skenaariota lukuun ottamatta.

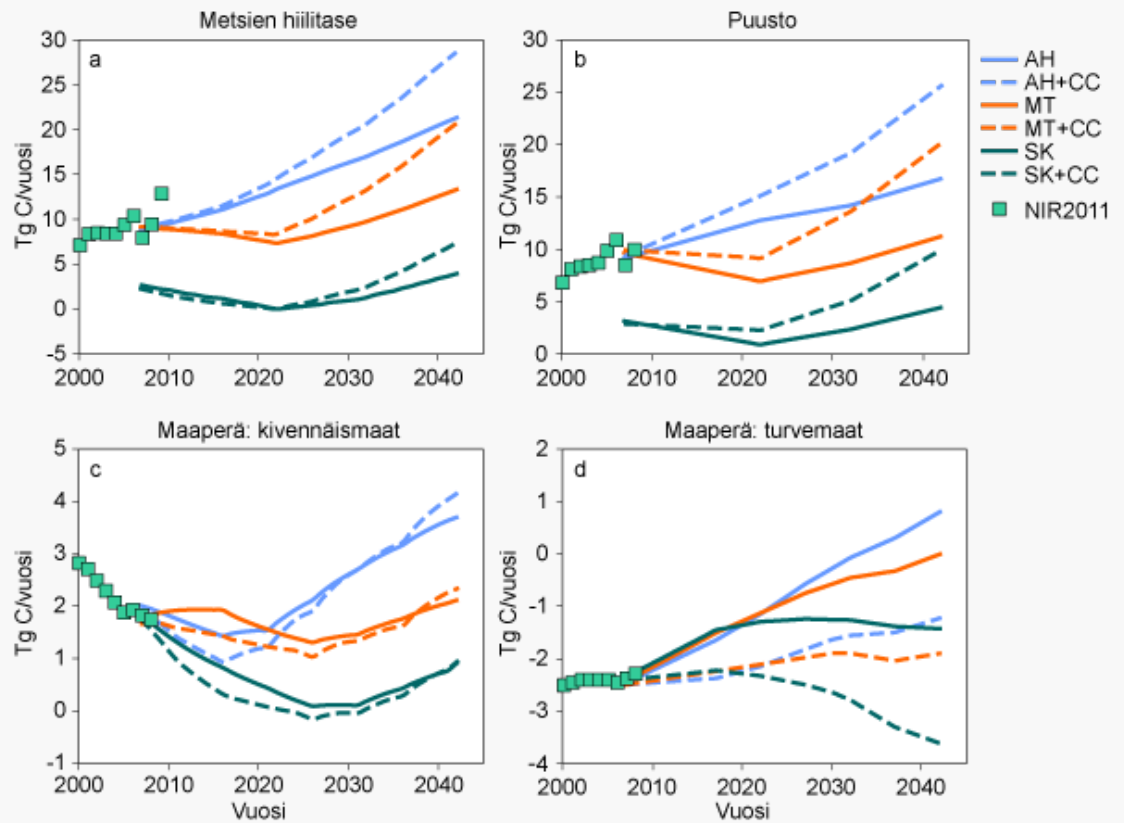
Maltillisen skenaarion mukainen (Taulukko 1) 7,5 miljoonan kuutiometrin lisäys energiapuun korjuussa vähentää metsänielua noin 3,5 miljoonalla hiilitonnilla.



Kuva 1. Metsien puustopääoman kehitys. AH on Alhaisen, MT Maltillisen ja SK Suurimman mahdollisen puunkäytön skenaario. CC= ilmastonmuutos A1B skenaario -perusteisesti on mukana laskelmissa.



Kuva 2. Harvennushakkuista tulee yhä merkittävämpi osa puuhoiltoa. Kuvaajien merkintä on kuten kuvassa 1.



Kuva 3. Metsien (= kaikki varastot yhteensä, A), puuston (B), kivennäismaiden (C) ja ojitettujen soiden maaperän (D) hiilivarastojen muutokset eri skenaarioissa; Alhainen (sininen viiva), Maltillinen (punainen) ja Suurin kestävä (vihreä) puun käyttö. CC=ilmastonmuutos on mukana laskelmissa. Vihreät neliöt ovat kasvihuonekaasuraportoinnin vuotuiset arviot v. 2000–2009 vuonna 2011 tehdystä inventaariosta. Positiiviset arvot tarkoittavat nielua ja negatiiviset lähdeä.

Kirjoittaja: *Risto Sievänen*

Teksti perustuu raporttiin: Asikainen, A., Ilvesniemi, H., Sievänen, R. & Vapaavuori, E. (eds.) 2012. *Bioenergia, ilmastonmuutos ja Suomen metsät. Metlan työraportteja/Working Papers of the Finnish Forest Research Institute* 240.

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Elina Vapaavuori](#)
- Hanke 3442: [Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa -koordinointi](#)

[← Takaisin raportin sisältöön](#)

[↑ Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036201>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Metsänjalostuksella edistetään metsäpuiden sopeutumista muuttuvaan ilmastoon

Ilmastoennusteiden mukaan vuoden keskilämpötila voi nousta Suomessa vuosisadan loppuun mennessä jopa yli 7 °C ja sadanta lähes 40 % ajanjaksoon 1961–1990 verrattuna. Lämpötilan nousun ja sateisuuden lisääntymisen arvioidaan olevan suurin talviaikaan. Kasvukautta puolestaan uhkaavat ilmastolliset ääri-ilmiöt, kuten pidentyvät helle- ja kuivuusjaksot sekä rankkasateet.

Metsäpuumme ovat pitkäikäisiä, joten menestyäkseen niiden tulee sopeutua vaihteleviin ja muuttuviin ympäristöoloihin. Metsätalouden kannalta tärkeitä kysymyksiä ovat: Millainen on puulajiemme ja eri alkuperien sopeutumiskyky tulevaisuuden ilmastossa? Mitä kriteereitä tulisi käyttää puu- ja puulajivalinnoissa tulevaisuuden metsänviljelyä varten? Voidaanko esimerkiksi rakenteellisia erityispiirteitä, kuten kapealatvaisuutta käyttää valintakriteerinä hyvästä sopeutumiskyvystä tuulituhojen välttämiseksi?

### Eteläistä alkuperää olevat taimet vaurioituvat herkemmin kuin paikalliset

Suomessa metsien kasvun on arvioitu lisääntyvän merkittävästi, etelässä 12 %:lla ja pohjoisessa jopa 109 %:lla nykyiseen verrattuna. Kasvuhyödyt jäävät saamatta, jos puut kuolevat jo taimivaiheessa heikon talveentumisen, talvilevon purkautumisen tai liian aikaisen kasvuunlähdon vuoksi.

Selvitimme kuuden metsäpuun taimilla niiden sopeutumista A1B-skenaarioiden mukaisiin olosuhteisiin 2100-luvulla. Tutkimme kokeellisesti, miten lämpötilan nosto, sadantamuutokset ja kohotettu hiilidioksidipitoisuus vaikuttavat taimien pakkaskestävyyden kehittymiseen syksyllä, miten edellisen kasvukauden olosuhteet muuttavat taimien talvilevon purkautumisherkkyyttä talviaikaisen lämpöjakson yllättäessä sekä suveentumiseen keväällä. Kokeissa oli yhteensä noin 170 000 tainta. Koemateriaalina olivat eteläsuomalaiset ja lähinnä Baltian maista, Etelä-Ruotsista, Tanskasta, Puolasta sekä Saksasta peräisin olevat männyt, kuuset, koivut, tammet ja metsälehmukset. Kaikki testatut haavat olivat Etelä-Suomesta.

Tutkimustulosten mukaan taimien selviytymismahdollisuuksiin vaikuttavat kasvuolosuhteet ja niiden alkuperä. Sekä kotimaisten että eteläisten alkuperien talveentumisnopeus hidastui kasvatusolosuhteiden lämmitessä, talvilevon purkautumisalttius kasvoi ja kasvuunlähde siirtyi hieman myöhemmäksi.

Eteläiset alkuperät vaurioituivat enemmän kuin kotimaiset, kun kasvukauden lämpötilat nousivat. Tämä johtui siitä, että tutkimuksessa käytettiin eteläsuomalaisia valaistusolosuhteita, joihin Suomea eteläisemmät alkuperät eivät ole sopeutuneet. Valo mahdollisti eteläisten alkuperien kasvun jatkumisen pitkälle syksyyn. Ne myös aloittivat kasvun hieman aikaisemmin kuin paikalliset alkuperät.

Tutkimuksessa verrattiin myös metsikkösiemenestä ja



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

#### Koetuloksia taimien sopeutumisesta tulevaisuuden ilmastoon:

- Kasvukauden kohonneet lämpötilat hidastivat talveentumista selkeästi. Männyllä ja kuusella talveentuminen myöhästyi viikosta kahteen, ja haapa saattoi jäädä talveentumatta. Alttius jälkikasvulle lisääntyi ja oli herkin haavalla ja tammella.
- Korkeissa kasvulämpötiloissa hiilidioksidi nopeutti talveentumista tutkituilla havupuulajeilla.
- Kuivuus yhdessä korkeiden lämpötilojen kanssa hidasti nopeakasvuisten lehtipuiden talveentumista.
- Kasvukauden aikaisten kasvatuslämpötilojen nousu nopeutti talvilevon purkautumista sydäntalvella lehtipuilla, mutta havupuilla vauriotaso jäi vähäiseksi.
- Lämpimien kasvuolosuhteiden johdosta heikosti talveentuneilla lehtipuilla lyhytkin lämpöjakso talvella aiheutti mittavia vaurioita ja korkeat kasvukauden aikaiset lämpötilat yhdistettynä kuivuuteen aikaistivat ja voimistivat vahinkoja.
- Edellisen kasvukauden olosuhteet vaikuttivat nuorten

jalostetuista siemeneristä kasvatettujen männyn taimien menestymistä muuttuvissa oloissa. Alustavien tulosten perusteella eroja ei ollut eli talveentuminen, talvilevon purkautumisriski ja suventuminen oli samanlaisia siemenlaadusta riippumatta.

taimien kasvunlähdeön seuraavana keväänä: mitä kylmemmät olosuhteet edellisenä kasvukautena sen aikaisemmin taimet lähtivät kasvamaan seuraavana keväänä. Kosteus ja korkea hiilidioksidipitoisuus korkeammassa kasvatuslämpötiloissa näytti jonkin verran hidastavan kasvuunlähtöä.

Tulevaisuuden olosuhteet vaikuttavat merkittävästi myös puiden lisääntymiseen. Eri puulajit reagoivat eri tavoin ja eri aikaan ympäristöolosuhteisiin, mikä saattaa vaikuttaa eri lajien ja alkuperien lisääntymispotentiaaliin. Esimerkiksi hybridihaapa saattaa hyötyä lämpenevästä ilmastosta enemmän kuin kotimainen haapa. Männyn geenivirran havaittiin olevan varsin voimakasta ja siitepölyn alkuperä- ja genotyyppi näyttävät vaikuttavan myös siementuotantoon.

## Metsänjalostusta tarvitaan: Suomen tulevaisuuden olosuhteita ei löydy muualta

Suomi on on siinä mielessä erikoinen maa, että mistään ei löydy olosuhteista, jotka vastaavat Suomen tulevaisuuden olosuhteita. Tämä johtuu siitä, että päivänpituudeltaan Suomea vastaavat alueet ovat joko selvästi kylmempiä tai erittäin mereisiä alueita. Etelän lämpimimmillä alueilla päivänpituus on kasvukauden aikana lyhyempi kuin Suomessa.

Metsänjalostuksen perinteiset menetelmät ovat hitaita ja valinta perustuu aina menneisyyden olosuhteissa tehtyihin mittauksiin. Uusien valintamenetelmien kehittäminen on välttämätöntä, kun pyritään turvaamaan parhaiten soveltuvan viljelymateriaalin saatavuus myös tulevaisuudessa.

Sopeutuneen materiaalin varhaisvalinnan kehittämiseksi tutkimme, miten syysvärin kehittyminen ja silmunmuodostus kuvaavat talveentumista. Tuloksemme osoittivat, että mitään selkeää yhteyttä päätesilmun muodostumisen ja talveentumisen välillä ei ole. Syysvärin yhteys talveentumiseen oli sen sijaan selvä. Myös yli 10 vuotta jatkuneiden kenttäkokeiden tulokset osoittavat, että taimitarhalla aikaisemmin syysvärjäytyneet taimet selviävät maastossa paremmin hengissä kuin siemenerän vihreänä pysyneet taimet.

Toisena keskeisenä tutkimusaiheena valintamenetelmien kehittämisessä arvioimme, miten eri tavoin saatuja tuloksia voidaan yleistää. Yleishavainto on, että lyhytkestoisten ”pikakokeiden” tuloksiin tulee suhtautua varovaisesti ja parhaimmillaankin yleistettävyyksi liittyy lähinnä selviytymiseen liittyviin ominaisuuksiin. Käytännössä tämä viittaa siihen, että pyrittäessä valitsemaan materiaalia jonkun ominaisuuden suhteen muuttuviin ja/tai vaihteleviin ympäristöolosuhteisiin pitäisi myös selvittää käytettävien valintamenetelmien tarkkuus ja tehokkuus riittävän monipuolisesti.

## Kapeanlatvainen kuusi soveltuu tehokkaaseen biomassan tuotantoon

Puiden hyvä sopeutumiskyky on olennaisen tärkeää, jotta ne selviävät tulevaisuuden ilmastossa. Tuleviin olosuhteriskeihin voidaan varautua myös viljelytekniikalla. Yksi vaihtoehto on kiertoaikojen lyhentäminen ja muutokset metsänhoidon toimenpiteissä ja niiden ajoituksessa.

Pitkäaikaisten kenttäkokeiden perusteella näyttää siltä, että perinnöllisesti kapealattaisen kuusen (*Picea abies f. pendula*) kiertoaikaa voitaisiin lyhentää ja sitä kautta alentaa muun muassa tauti- ja tuuliturhoriskia. Tuho- ja tuuliriskia vähentää myös se, että kapealattaisella kuusella harvennushakkuuta ei tarvita, vaan puusto korjataan avohakkuuna kiertoajan jälkeen.

Tuotteena olisi tällöin lähinnä kuitupuuta, jolla voitaisiin päästä varsin korkeisiin hehtaarikohtaisiin tuotoksiin puuaineksen rakenteenkin pysyessä varsin korkeatasoisena. Myös männynllä pienioksaainen puutyyppi voisi mahdollistaa nykyistä jonkin verran lyhyemmän kiertoajan.

## Miten metsänhoidossa pitäisi varautua ilmastomuutokseen?

Tutkimuksen perusteella näyttää siltä, että tuulipölytteisesti lisääntyvät puulajit pystyvät varsin nopeasti sopeutumaan jopa suhteellisen nopeisiin muutoksiin. Tästä huolimatta metsänviljelyssä pitää kiinnittää huomiota erityisesti siihen, millä puulajeilla ja erityisesti millä alkuperillä Suomen metsät tulevaisuudessa uudistetaan.

Tutkimuksen tulokset viittaavat vahvasti siihen, että suorilla siemensiirroilla Keski-Euroopasta, eli lämpöolosuhteista, jotka Suomessa voivat vallita 2080–2100 paikkeilla, ei ainakaan sopeutumisen suhteen voiteta mitään, vaan pikemminkin päinvastoin. Nykyisin käytössä olevat taimialkuperät näyttävät selviävän selvästi paremmin myös tulevaisuuden olosuhteissa kuin etelämmästä tuodut alkuperät. Jonkin verran eteläisempää – Viro, Latvia, ehkä Etelä-Ruotsi – siemenmateriaalia voitaneen tulevaisuudessa ehkä käyttää.

Myös kiertoaikojen ja istutustiheyksien muutoksilla voidaan rajoitetusti lieventää ilmastomuutoksen vaikutuksia. Yksi mahdollisuus olisi käyttää varsinkin lajien sisäisiä hybridejä, joista hybridihaapa on hyvä esimerkki. Se tuottaa nykyisissä olosuhteissa paremmin kuin kumpikaan sen peruslajeista eikä sen sopeutuminen tulevaisuudenkaan olosuhteisiin näytä olevan huonompi kuin paikallisella haavalla.

Soveltuvien hybridien tuottaminen ja testaaminen varsinkin lajeilla, joissa kasvullinen lisäys on mahdollista, pitäisikin ottaa keskeiseksi tutkimus- ja kehittämiskohteeksi, kun pohditaan tulevaisuuden

metsänviljelymateriaaleja. Muita keskeisiä tutkimus- ja kehittämiskohteita pitäisi olla korkea plastisuus eli käytännössä genotyyppien ja alkuperien kyky hyödyntää muuttuvia olosuhteita, sekä hyvä stabiliteetti, joka auttaisi ennustamaan miten puut reagoivat muuttuviin olosuhteisiin.

Kirjoittaja: *Pertti Pulkkinen*

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Pertti Pulkkinen](#)
- Muut tutkijat: Anne Pakkanen, Sinikka Salonen, Eira-Maija Savonen, Lu-Min Vaario ja Saira Varis
- Hanke 3439: [Metsät 2050](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036202>

Päivitetty: 05.10.2012 /KPB/SJor

| Copyright Metla | [Palaute](#)

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Koivu sopeutuu muuttuvaan ilmastoon

### Raudusten silmunpukkeamisessa lievää aikaistumista

Koivujen hento vihertyminen on useimmille suomalaisille merkki kevään saapumisesta. Ja hyvä merkki onkin, sillä yksityiskohtaiset mittaukset osoittavat, että raudusten silmujen puhkeamisen ajankohta määräytyy keväisen lämmön kertymisen (lämpösumman) perusteella. Raudukset seuraavat lämpösummaa niin tarkasti, että virhe on vain yksi päivä, mikäli ennustetaan silmunpukkeamisen tapahtuvan lämpösummalla 25. Lämpösummalla tarkoitetaan 5 °C ylittävien vuorokausikeskiarvojen summaa.



Kuva: Matti Rousi

Pitkäaikaisten ilman lämpötilan mittausten avulla voidaan määrittää päivä, jolloin koivun silmuunpukkeamiseen vaadittava lämpösumma on saavutettu 80 vuoden ajanjaksona. Aikasarja osoittaa silmunpukkeamisen lievää aikaistumista, keskimäärin noin 1 vrk 10 vuodessa. Lisäksi vuosien välinen vaihtelu kevään saapumisesta näkyy aikasarjassa erittäin selvästi. Vuosien välisestä vaihtelusta seuraa, että luotettavien ennusteiden laatiminen silmujen puhkeamisesta vaatii vähintään 30 vuoden havaintojakson.

Lisätietoa: Temperature sum accumulation effects on within-population variation and long-term trends in date of bud burst of European white birch (*Betula pendula*). Rousi & Heinonen, *Tree Physiology* 27. 2007

### Lämpötilan nousu parantaa koivun kasvua



Kuva: Maarit Mäenpää

Kohotetuissa lämpötiloissa kasvavien koivujen kasvukausi pitenee, lehdet uusiutuvat nopeammin ja lehtipinta-ala ja yhteyttäminen lisääntyvät. Lämpeneminen lisää myös puiden kestävyyttä ilmansaasteiden, kuten alailmakehän otsonin, haitallisia vaikutuksia vastaan.

Ennusteiden mukaan ilmaston lämpeneminen johtaa siihen, että yölämpötilat nousevat enemmän kuin päivälämpötilat. Tämän on arveltu lisäävän soluhengitystä ja siten kuluttavan kasvien energiavaroja. Kasvukammiokoeket kuitenkin osoittivat, että mitä korkeampi yölämpötila sitä terhakemmin koivut kasvavat. Alhaiset yölämpötilat johtavat kasvun päättymiseen aikaisin.

Kasvun voidaan olettaa lisääntyvän entisestään, mikäli

yölämpötilat nousevat enemmän kuin päivälämpötilat. Tutkimustuloksista ei kuitenkaan voida päätellä mitä tapahtuu mikäli olosuhteet ovat selvästi erilaiset kuin kokossa: kasvukauden keskilämpö lisääntyy enemmän kuin 1 °C tai yölämpö ylittää 22 °C, tai jos muut olosuhteet, kuten ravinteiden ja veden saanti, rajoittavat kasvureaktioita.

Aiheesta enemmän: Maarit Mäenpään väitöskirjasta. Impacts of temperature and ozone on carbon retention processes of birch and aspen. Joensuun yliopisto, biotieteen laitos. 2012.

### Suomalaisilla rauduksilla ilmiömäinen kyky sopeutua erilaisiin ilmasto-oloihin

Erityisesti pohjoisilla alueilla on odotettavissa nopeita ilmastomuutoksia. Pitkäikäisten puiden on kestävä muutokset, jotta parhaimmat yksilöt pystyvät jatkamaan sukua ja tuottamaan uutta materiaalia luonnonvalinnalle.

Luotettavin tapa tutkia sopeutumiskykyä on siirtää suomalaiset puut kasvamaan pitkäaikaisiin kenttäkokeisiin täysin uuteen ympäristöön.

Tulokset kymmenvuotisesta kenttäkokeesta eteläisessä Kanadassa osoittavat rauduksen vakuuttavaa sopeutumiskykyä Suomeen ennustettuihin lämpötiloihin. Osa koivuista (Rovaniemen alkuperä) kasvoi Kanadassa selvästi lämpimämmissä oloissa kuin, mitä pahimmatkaan ennusteet Suomeen (Rovaniemelle) ennustavat. Meikäläiset koivut jäivät kaikki henkiin ja eteläsuomalaiset kasvoivat Kanadassa 20–30 % nopeammin kuin kanadalaiset serkkunsa (kanoottikoivu), vaikka ilmasto-olot poikkesivat suomalaisista muutenkin kuin lämpimyden osalta. Kanadalaiset näyttävät asettavan raudukseen suuria toiveita sekä metsätaloudessa (nopea kasvu, hyvä laatu) että maisemanhoidossa (näyttävä puu), joten sopeutumis- ja kasvukokeiden oletetaan jatkuvan.

Rauduskoivu voi sopeutua vieläkin rajumpiin ympäristömuutoksiin. Jopa Etelä-Korean kuumuudessa jotkut eteläsuomalaiset raudusalkuperät ovat päihittäneet korealaiset koivut (Japanin raudus). Siirtokokeet osoittavat myös, että jotkut raudusyksilöt pystyvät hyödyntämään uusia kasvuolosuhteita poikkeuksellisen hyvin. Yksilövaihtelu antaa hyvät mahdollisuudet valita ja jalostaa viljelymateriaalia tulevaisuuden ilmastoon.

Rauduksen ilmiömäinen kyky sopeutua monenlaisiin kasvuoloihin ei ehkä kuitenkaan ole yllätys, sillä 70 miljoonaa vuotta kestäneen historiansa aikana koivujen kasvuolosuhteet ovat vaihdelleet rajusti.

Aiheesta enemmän: Matti Rousi, Boy J.H.M. Possen, Risto Hagqvist & Barb R. Thomas. 2012. From the Arctic Circle to the Canadian prairies – a case study of silver birch acclimation capacity. *Silva Fennica* 46(3).

## Etelästä tuleva siitepöly ei auta rauduksen sopeutumista



Kuva: Matti Rousi

Koivun siitepölyn tuotto on tavattoman runsasta, ja siitepöly leviää ilmapirtausten mukana pitkiä matkoja. Esimerkiksi Lapissa joidenkin vuosien siitepölymäärästä jopa 65 % on peräisin Etelä-Suomesta ja mahdollisesti etelämpääkin. On arveltu, että siitepölyn mukana leviävät eteläiset perintötekijät nopeuttavat koivujemme sopeutumista lämpenevään ilmastoon.

Kaukokulkeutuneella siitepölyllä voisi olla mahdollisuus pölyttää paikalliset emit, mikäli ne ovat vastaanottavia ennen paikallista siitepölyntuottoa. Mutta näin ei ole, sillä metsikön emi- ja hedekukinta alkaa samanaikaisesti. Lisäksi kevään lämpö määrää kukinnan alkamisen – kuten silmunpuhkeamisenkin – hyvin tarkasti. Tämän vuoksi yleensä vain

lähialueiden koivujen kukinta on synkronissa.

Yksittäisten raudusten siementuotto vaihtelee hyvin paljon, osa puista tuottaa hyvin vähän – tai ei ollenkaan – siemeniä. Kahdeksanvuotisen havaintosarjamme mukaan paras puu tuotti yhteensä 12 miljoonaa siementä, mikä oli kaksi kertaa enemmän kuin kymmenen huonoimman puun siementuotto. Parhaat kukkijat siis määrittävät tulevan metsikön perinnöllisen rakenteen. Puiden välinen vaihtelu kukinnan ajoittumisessa ei heijastu mitenkään siementen määrään tai laatuun. Ilmeisestikään valinta ei suosi aikaisin kasvunsa alkavia puuyksilöitä.

Siementuotannon arvellaan kuluttavan puiden resurssveja ja lopulta näkyvän alentuneena kasvuna erityisesti, kun samat puut tuottavat jatkuvasti suuria siemenmääriä. Silti kokeemme hyvät siementuottajat olivat myös parhaiten kasvavia puita. Koivun siementuotto saattaa lisääntyä entisestään, sillä lämpimät kesät paransivat kukintaa.

Metsänhoidossa ja metsänjalostuksessa kannattaa varmistaa, että siemenpuukoivuiksi ei valita huonosti kukkivia yksilöitä, sillä kolmasosa rauduksista ei tuota siementä juuri lainkaan. Parhaiten kukkivia puita ei tarvitse välttää kasvuunmenetyksen pelossa. Kukinnan määrä on helppo tarkistaa lehdettömänä aikana, jolloin hedemäärien suhteelliset erot on helppo havaita. Puun hede- ja emikukkien määrä korreloi voimakkaasti, joten hedemäärät ovat hyvä kukinnan indikaattori.

Aiheesta enemmän: Rousi, M., Heinonen, J. & Neuvonen, S. 2011. Intrapopulation variation in flowering phenology and fecundity of silver birch, implications for adaptability to changing climate. *Forest Ecology and Management* 262: 2378–2385.

Kirjoittaja: *Matti Rousi*

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Matti Rousi](#)
- Muut tutkijat: Jaakko Heinonen, Juha Heiskanen, Heikki Henttonen, Boy Possen ja Elina Vapaavuori
- Hanke 3440: [Koivun sopeutuminen muuttuvaan ilmastoon](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[← Takaisin raportin sisältöön](#)

[↑ Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036203>

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

### Rauduskoivun siemensiirrot: kotimaiset, paikallisiin olosuhteisiin sopeutuneet siemenet paras valinta

Kansallisessa ilmastonmuutosstrategiassa on ehdotettu, että metsänviljelyssä käytetään nykyistä eteläisempiä alkuperiä. Ne voisivat pidemmän kasvujakson ansiosta hyödyntää pitenevää kasvukautta paremmin kuin paikalliset alkuperät. Siemenen siirrolla etelästä pohjoiseen voitaisiin siten saavuttaa jonkin verran kasvunlisää. Syksyllä pitkään jatkuvaan kasvuun ja myöhäiseen talveentumiseen liittyy riskejä myös lämpenevässä ilmastossa.

Uusimmat kenttäkokeiden tulokset eivät anna aihetta rauduskoivun siemensiirtoetäisyyksien pidentämiseen huolimatta ilmaston lämpenemistrendistä. Siemensiirtojen vaikutusta rauduskoivun tuotokseen ja runkojen vikaisuuteen tutkittiin pitkäaikaisissa maastokokeissa, jotka sisälsivät alkuperiä muun muassa Suomesta, Ruotsista ja Virossa.



Kaupallisen ainespuun mitat täyttäviä 19-vuotiaita koivuja Lopen kenttäkokeella. Kuva: Metla/Katri Kostainen.

### Puualkuperien ilmastoon sopeutumista sekä tuotos- ja laatueroja testataan provenienssikokeissa

Maastoon perustetuissa provenienssi- eli alkuperäkokeissa verrataan saman puulajin erilaisia maantieteellisiä alkuperiä samalla kasvupaikalla. Männyn ja kuusen provenienssitutkimukset aloitettiin Metsätutkimuslaitoksessa jo 1920-luvulla. Koivu oli pitkään heikosti arvostettu puulaji metsätaloudessa, minkä vuoksi koivun jälkeläiskoetointa alkoi vasta 1960-luvulla, ja metsikköalkuperiä sisältäviä, siemensiirtotutkimusta palvelevia koivun provenienssikokeita perustettiin 1980-90 –luvulla.

Provenienssikokeista saadaan tietoa puulajien maantieteellisestä vaihtelusta, joka on lähtökohtana metsänviljelyaineiston alkuperävalinnalle, siemenalkuperien siirto- ja käyttöaluesuosituksille sekä metsänjalostukselle. Provenienssikokeiden perusteella voidaan tehdä päätelmiä puiden sopeutumisesta erilaisiin ilmasto-oloihin. Alkuperien väliset erot vuosirytmisissä, elävyydessä, tuotoksessa ja ulkoisessa laadussa näkyvät yleensä hyvin provenienssikokeissa.

### Siemensiirto vaikuttaa elävyyteen, kasvuun ja rungon laatuun

Tutkimuksessa verrattiin pohjoiseurooppalaisia rauduskoivualkuperiä ja selvitettiin etelä-pohjoissuuntaisten siemensiirtojen vaikutusta kasvuun ja rungon laatuun kaupallisen ainespuun koon saavuttaneista 19-vuotiaista puista. Aineistona oli viisi vuonna 1991 maastoon perustettua provenienssikoetta, jotka sijaitsivat Etelä-Suomesta (Loppi, leveysaste 60°39'N) Pohjois-Suomeen (Rovaniemi, 66°21'N) (Kuva 1). Neljä koetta sijaitsi mustikkatyyppin metsämaalla ja yksi entisellä pellolla. Kokeissa verrattiin rauduskoivun metsikkösiemeniä leveysasteiden 53°N ja 67°N väliseltä alueelta Suomesta, Ruotsista, Virossa, Skotlannista ja Venäjältä.



Kuva 1. Tutkimuksessa verrattiin Suomesta, Ruotsista, Virosta, Skotlannista ja Venäjältä kotoisin olevia rauduskoivualkuperiä (●) viidessä kenttäkokeessa (■) Lopelta Rovaniemelle.

Alkuperien välillä oli suuria eroja elävyydessä, pituudessa, läpimitassa, tuotoksessa ja runkovikojen määrissä kaikilla koepaikoilla. Etelästä pohjoiseen tai pohjoisesta etelään tehdyn siemensiirtoetäisyyden vaikutus koivualkuperien kaikkiin tutkittuihin ominaisuuksiin oli merkitsevä. Pitkä siirtoetäisyys sekä etelästä että pohjoisesta johti heikkoon tulokseen.

Tutkimuksen mukaan paras elävyys saavutettiin paikallisilla tai enintään noin kaksi leveysastetta (n. 220 km) pohjoisemmilla alkuperillä, ja niillä oli myös vähiten runkovikoja. Pituuskasvultaan parhaita olivat paikalliset tai enintään noin kaksi leveysastetta eteläisemmät alkuperät. Tuotoksen suhteen paras siirtoetäisyys ja siirron suunta vaihteli kokeittain. Lopen, Kannonkosken ja Toholammin kokeilla saavutettiin paras tuotos paikallisilla tai enintään kaksi leveysastetta eteläisemmällä alkuperillä, kun taas ankarammissa oloissa sijaitsevilla Ilomantsin ja Rovaniemen kokeilla paikalliset tai hieman pohjoisemmat alkuperät menestyivät parhaiten.

Varovainen alkuperäsiirto etelästä pohjoiseen voi siten parantaa tuotosta, mutta samalla heikentää hieman puiden ulkoista laatua. Vastaavasti siirto pohjoisesta näyttäisi parantavan laatua, mutta heikentävän tuotosta. Siirron vaikutus ei kuitenkaan ole kahden leveysasteen siirtoetäisyyden rajoissa kovin merkittävä. Jos taas siirtoetäisyyttä etelästä kasvatetaan, taimet paleltuvat herkemmin, puiden laatu heikkenee, kuolleisuus lisääntyy ja tuotos jää heikoksi. Pitkät alkuperäsiirrot altistavat puuta myös biotillisille tuhoille. Eteläisten rauduskoivualkuperien on esimerkiksi havaittu maistuvan hirvellen paremmin kuin paikalliset tai pohjoiset alkuperät.

## Valojakson muutos käynnistää talveentumisen eri alkuperillä eri aikaan

Kun koivualkuperiä siirretään pitkiä matkoja etelä-pohjois -suunnassa, ne joutuvat lähtöalueestaan poikkeaviin valojakso-oloihin. Valojakso säätelee suurelta osin koivuntaimien pituuskasvun päättymistä ja talveentumista. Yön piteneminen loppukesällä yli tietyn kynnyksarvon, ns. kriittisen yön pituuden, saa ne päättämään kasvunsa ja siirtymään lepotilaan. Kriittinen yön pituus on erilainen eri leveysasteilta kotoisin olevilla alkuperillä, ja on eteläisillä pidempi kuin pohjoisilla.

Alkuperäsiirto vaikuttaa siten koivuntaimien kasvun päättymisen ja talveentumisen aikatauluun ja edelleen menestymiseen. Eteläiset alkuperät pohjoiseen siirrettyinä jatkavat pohjoisen pitkässä päivässä kasvua myöhään syyskesään, mikä tekee niistä nopeakasvuisia, mutta samalla alttiita pakkasvaurioille.

Valojakson lisäksi koivun pituuskasvun päättymiseen ja talveentumiseen vaikuttavat myös monet muut tekijät, kuten lämpötila, vesitalous ja ravinteiden saatavuus. Viimeaikaisissa tutkimuksissa onkin osoitettu, että sekä kohonnut lämpötila että kohonnut ilmakedän hiilidioksidipitoisuus myöhentävät rauduskoivun lehtien kellastumista ja varisemista, ja saavat puut jatkamaan kasvua pidemmälle syksyyn. Tämä saattaa lisätä paleltumisriskiä jopa paikallisilla alkuperillä esimerkiksi syksyinä, jolloin ankaria yöpakkasia esiintyy aikaisin. Tällöin eteläisten alkuperien käyttö voisi lisätä riskejä entisestään.

## Aiemmat ohjeet pätevät edelleen ja siemensiirroissa on riskinsä myös tulevaisuuden ilmastossa

Aiempien tutkimusten mukaan noin 200 km mittaiset siemensiirrot etelästä pohjoiseen tai päinvastoin eivät vaikuta merkittävästi rauduskoivun kasvuun tai laatuun. Niiden pohjalta on suositeltu, että koivulla siemensiirtojen pituus ei ylittäisi 150 km etelä-pohjois -suunnassa. Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat hyvin

samansuuntaisia aiempien kanssa, eikä niiden perusteella ole syytä suositella pidempiä siirtoja. Ilmastossamme tapahtunut lämpeneminen, ei näyttäisi vielä vaikuttaneen koivualkuperien menestymiseen.

Huolimatta siitä, että lämpenemisen on ennustettu jatkuvan, ilmastossamme esiintyy tulevaisuudessakin vuotuista sääolojen vaihtelua, joten riskit pakkasvaurioista kasvukauden alussa ja lopussa eivät häviä. Puiden on selviydyttävä herkän taimivaiheen ohi ennen kuin voidaan odottaa hyötyjä kasvun lisääntymisenä tulevaisuuden ilmastossa. Useiden satojen kilometrien mittaiset siirrot johtaisivat todennäköisesti viljelyn epäonnistumiseen myös tulevaisuuden ilmastossa.

Rauduskoivun viljelyn suosio on viime vuosina vähentynyt eri syistä, muun muassa tiheiden hirvikantojen aiheuttaman suuren tuhoriskin vuoksi. Koivun viljelyyn on tarjolla riittävästi kotimaista jalostettua siemenviljelyssiementä, eikä ulkomaisten alkuperien tuonnille ole tarvetta. Parhaiden kotimaisten ja paikallisiin olosuhteisiin sopeutuneiden alkuperien käyttö on jatkossakin turvallisempaa kuin riskialttiiden siirrettyjen alkuperien viljely muuttuvassa ja vaikeasti ennustettavassa ilmastossa.

Kirjoittajat: *Anneli Viherä-Aarnio* ja *Elina Vapaavuori*

- Hanke 3440: [Koivun sopeutuminen muuttuvaan ilmastoon](#), vetäjä: [Matti Rousi](#)
- Hanke 3442: [Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa –koordinointi](#), vetäjä: [Elina Vapaavuori](#)
- Hanke 3465: [Muuttuvan ilmaston vaikutus rauduskoivun kasvuun ja puuaineen ominaisuuksiin](#), vetäjä: [Pekka Saranpää](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036204>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Miten ilmastonmuutos ja metsätalous vaikuttavat metsäkasvivyhteisöjen rakenteeseen?

Metsätalouden menetelmät ovat muuttuneet voimakkaasti 1950-luvulta lähtien. Metsänhoidon seurauksena puusto on nykyään keskimäärin nuorempaa kuin viime vuosisadan puolivälissä. Silti puuston kokonaismäärä ja kasvu ovat nyt melkein kaksinkertaisia 1950-lukuun verrattuna. Samanaikaisesti ilmakehän hiilidioksidipitoisuus on kasvanut nopeasti ja ilmasto lämmennyt niin, että viimeisten 15 vuoden aikana on mitattu 13 ilmastohistorian lämpimintä vuotta.

Ilmastonmuutoksella, oli kyse sitten lämpötilan, sademäärän tai ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden muutoksista, on vaikutuksia kasvilajien menestymiseen ja kasvuun, koska jokaisella kasvilajilla on ympäristötekijöiden suhteen omat vaatimus- ja sietoalueensa. Ilmaston muuttuminen voikin tulevaisuudessa siirtää, paitsi yksittäisten lajien, myös kokonaisten kasvillisuusvyöhykkeiden levinneisyysalueita. Myös metsien käsittely muuttaa aluskasvillisuutta sekä ympäristötekijöiden muuttumisen aiheuttamina suorina vaikutuksina että säätelemällä kasvilajien välisiä kilpailusuhteita.



Aluskasvillisuutta. Kuva: Hannu Nousiainen

Tutkimuksessa tarkasteltiin metsätalouden ja ilmastonmuutoksen mahdollisia vaikutuksia kivennäismaiden ja suometsien aluskasvillisuuteen. Työ perustui laajoihin aluskasvillisuuden ja puuston inventointi- ja seuranta-aineistoihin vuosilta 1951–2006. Tutkimuksessa hyödynnettiin myös Ilmatieteen laitoksen aikasarjoja ilmaston vaihtelusta ja ilmastonmuutoskkenaarioita.

## Metsien ikärakenteen muutos ja soiden ojitus muuttaneet eniten metsä- ja suokasvillisuutta

Suomen metsä- ja suokasvillisuus on muuttunut suuresti viimeisten 60 vuoden aikana. 1950-luvulla alkanut intensiivinen metsätalous on lisännyt huomattavasti metsien kokonaispuumäärää ja muuttanut niiden ikärakennetta tasaisemmaksi. Metsät ovat entistä tiheämpiä ja nuorten kehitysvaiheitten osuus on kasvanut. Myös metsäojitukset, ojitettujen soiden lannoitus ja puuston käsittely ovat aiheuttaneet suuria muutoksia soilla. Metsä- ja suoympäristön muutos heijastuu selvästi aluskasvillisuuden rakenteessa tutkitulla seurantajaksolla 1951–2006.

Klusterianalyysissä 1950-luvun aineistosta eniten koealoja tuli kahteen varttuneiden metsien klusteriin. Toinen näistä sisälsi tuoreiden ja kuivahkojen kankaiden varttuneita metsiä koko maassa, toinen taas painottui pohjois- ja keskiboreaalisiin kuivahkojen kankaiden varttuneisiin männikköihin. Vuosien 1985 ja 1995 aineistosta eniten koealoja sijoittui rämeikasvillisuutta sisältäneeseen klusteriin ja eteläboreaalisiin tuoreisiin keski-ikäisiin kuusimetsiin painottuneeseen kivennäismaiden klusteriin.

Vanhojen metsien väheneminen Pohjois-Suomessa näkyi 1980- ja 1990-luvuilla koealojen vähenemisenä niissä kahdessa varttuneiden metsien klusterissa, joissa 1950-luvulla oli eniten koealoja. Keski-ikäisiä kivennäismaiden

### Tiedonlouhinta

Tutkimusaineistojen analysoinnissa käytettiin tiedonlouhintamenetelmiä, kuten klusterianalyysiä ja itseorganisoituvia kartoja (SOM). Klusteroinnissa kivennäismaiden ja soiden koealat vuosilta 1951-53, 1985-86, 1995 ja 2006 jaettiin kasvilajien läsnä- ja poissaolon perusteella kymmeneen mahdollisimman yhtenäiseen ryhmään eli klusteriin. Muodostuneet klusterit olivat keskenään erilaisia aluskasvillisuuden, koealojen maantieteellisen sijainnin, metsikön iän ja puulajisuhteiden, metsien ja soiden osuuden ja kasvupaikkatyyppin suhteen. Tiedonlouhinta toteutettiin yhteistyössä Aalto-yliopiston kanssa.

metsiä sisältävät klusterit kasvoivat 1950-luvun jälkeisissä inventoinneissa. Kivennäismaiden metsäkasvillisuuden lievä rehevöityminen näkyi tuloksissa lehtomaisiin – tuoreisiin kasvupaikkoihin painottuneiden klustereiden suurempina koealaosuuksina 1980-luvulla ja sen jälkeen. Näihin klustereihin sijoittuneet metsät olivat tyypillisesti nuoria ja keski-ikäisiä – siis nuorten metsien osuuden lisääntyminen on voinut aiheuttaa havaitun kasvillisuuden rehevöitymisen.

Vaikka kasvilajistossa havaittiin alueellisesti ja paikallisesti vaihduntaa, pitkällä aikavälillä koko Suomen metsien ja soiden keskeinen kasvilajisto on kuitenkin pysynyt samana.

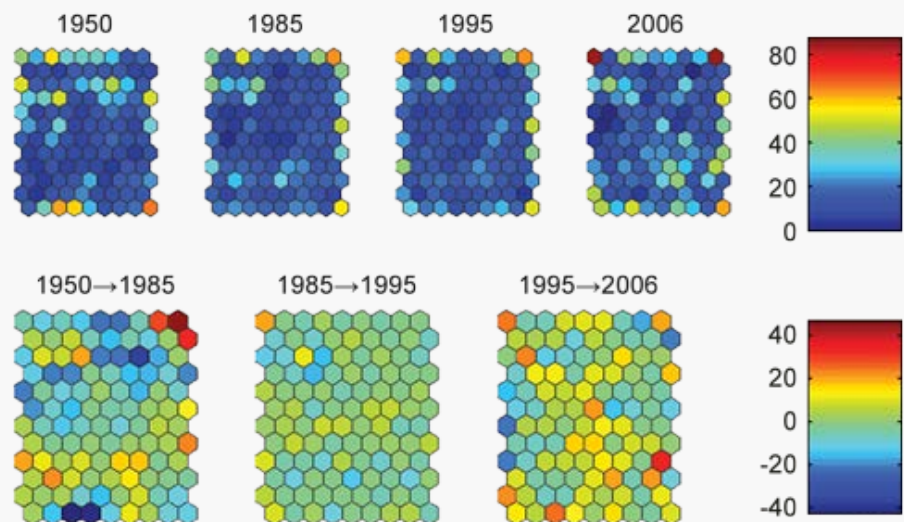
## Suurimmat metsäkasvillisuuden muutokset tapahtuivat jaksolla 1950–1985

Koko aineiston klusteroinnin lisäksi analysoimme pelkästään kivennäismaiden metsien aluskasvillisuuden muutoksia SOM-karttojen avulla. SOM-kartoissa toisiaan muistuttavat koealat asettuvat vierekkäisiin soluihin. Siten voitiin kartalla ryhmitellä eli klusteroida toisiaan aluskasvillisuudeltaan muistuttavia koealoja lajistoltaan melko yhdenmukaisiksi ryhmiksi. Pelkkiä kivennäismaiden metsiä tarkasteltaessa saatiin esiin tarkempi kuva kivennäismaiden metsien kasvillisuuden muutoksesta, kun luonteeltaan aivan toisenlainen suokasvillisuuden vaihtelu ei ollut analyysissä mukana.

SOM-karttojen soluista muodostetut luokat eli klusterit erosivat tässäkin analyysissä toisistaan kasvupaikkatyyppin, maantieteellisen alueen, metsikön iän ja puulajien osuuksien perusteella. Monissa klustereissa kuivahkojen kankaiden ja sitä karumpien kasvupaikkatyyppien osuus oli myöhemmissä aineistossa pienempi kuin 1950-luvun aineistossa.

1950-luvun ja 1980-luvun inventointien välillä tapahtui suurempia muutoksia kuin tämän jälkeen. Esimerkiksi viime vuosisadan alkupuolella kadonneita perinteisiä metsänkätömuotoja, kuten metsälaidunnusta ja kaskeamista, ilmentävät kasvilajit olivat radikaalisti vähentyneet ja samaan aikaan myös tähän lajistoon liittyvät koealat olivat vähentyneet (Kuva 1). Suolajisto taas lisääntyi, kuten myös tähän aineistoon liittyvät koealat. Suolajien yleistyminen ja runsastuminen näissä kivennäismaiden metsissä johtui todennäköisesti soiden ojituksista, joiden seurauksena monet entiset ohutturpeiset suometsät luokiteltiin viimeisissä inventoinneissa kivennäismaiden metsiksi. Vaikutus on havaittavissa, vaikka metsäojitus onkin vähentänyt suolajistoa soistuneissa kangasmetsissä.

Kivennäismaiden metsien aineistossa viimeisten 60 vuoden aikana havaitut aluskasvillisuuden muutokset johtuvat siis nekin maankäytössä ja metsänkäsittelyssä tapahtuneista muutoksista. Mikäli ilmaston lämpenemisellä on ollut lajistoa muuttava vaikutus, se peittyi metsien käytön muutoksista johtuvien vaikutusten alle.



Kuva 1. SOM-kartat kasvillisuusinventoinnille 1951–1953 ("1950"), 1985, 1995 ja 2006 (ylärivillä), sekä muutos perättäisten inventointien välillä (alariivillä). Värit ylärivillä kertovat montako koealaa kunkin SOM-kartan solussa on, ja alariivillä, kuinka monta koealaa kyseisestä solusta on poistunut tai montako sinne on tullut lisää. Asteikot ovat oikealla. Lajistomuutoksia tutkittaessa todettiin esimerkiksi, että kartan 1950->1985 kahdessa alarivissä tummansinisessä solussa kaskeamisen ja metsälaidunnuksen indikaattorilajit ovat vähentyneet ja oikean yläkulman kolmessa tummanpunaisessa solussa suolajit ovat lisääntyneet.

## Metsänkäsittely muuttaa kasvilajien runsaussuhteita

Tutkimme metsänkäsittelyn vaikutuksia aluskasvillisuuteen myös seuraamalla hakkaamattomien, uudistushakattujen ja muulla tavoin hakattujen kivennäismaan metsien kasvillisuutta pysyvillä koealoilla vuosina 1985–2006.

**Koko aineistossa** (mukana kaikki metsänkäsittelytavat) puiden ja pensaiden taimien (<50 cm) keskimääräinen peittävyys ja lajimäärä lisääntyivät 20 vuoden tarkastelujaksolla. Etelä-Suomessa myös ruohojen ja heinien keskimääräinen lajimäärä lisääntyi hieman etenkin rehevillä kasvupaikoilla. Jäkälien peittävyys ja lajiryhmien

määrä vähenivät koko maassa, mutta sammalten peittävydessä ja lajimäärässä ei havaittu sanottavia muutoksia.

**Hakkaamattomien** metsien ositteessa putkilokasvir ryhmien lajimäärä ja keskimääräinen peittävyys pysyivät suhteellisen vakaina. Mustikan peittävyys pysyi melko tasaisena, mutta puolukan peittävyys väheni rehevillä ja lisääntyi karummilla kasvupaikoilla. Suurimmat muutokset tapahtuivat pohjakerroksessa: sammalet runsastuivat jäkälien vähetessä. Etelä-Suomessa nämä muutokset lienevät suurelta osin sukkessiomuutoksia, mutta myös ajan myötä kertyneellä typpilaskeumalla on saattanut olla vaikutusta lajien välisiin kilpailusuhteisiin. Pohjois-Suomessa porolaidunnus on suurin jäkälien määrää vähentänyt tekijä.

**Uudistushakatuissa metsissä** ruohojen ja heinien keskimääräiset peittävydet ja lajimäärät lisääntyivät pian hakkuun jälkeen, kun taas varpujen keskimääräinen peittävyys väheni. 20 vuodessa hakkuun jälkeen heinien ja ruohojen peittävyys alkoi vähetä, mutta lajimäärä oli edelleen suuri. Tässä ajassa puolukan peittävyys oli palautunut lähelle hakkuuta edeltänyttä tasoa, mutta mustikan peittävyys oli edelleen vain neljänneksen hakkuuta edeltäneestä tasosta. Myös sammalten ja jäkälien peittävydet vähenivät uudistushakkuun yhteydessä, rehevien kasvupaikkojen lajit kuivien kasvupaikkojen lajeja enemmän.

Puolukka ja mustikka hyötyivät lisääntyneestä valon määrästä harvennus- ja muiden hakkuiden jälkeen. Heinät sitävastoin vähenivät, todennäköisesti varpujen lisääntyneen kilpailun aiheuttamana.

## Mitä metsäkasvillisuuden muutokset kertovat?

Metsätalous on huomattavin metsien rakennetta 1950-luvun jälkeen muuttanut tekijä. Intensiivisellä metsänkasvatuksella ja uudistusalojen maanmuokkauksella on ollut suuri merkitys myös aluskasvillisuudelle. Aluskasvillisuuden muutokset olivat hakkaamattomissa metsissä 20 vuodessa vähäisiä. Niiden tulkittiin aiheutuneen sukkessiomuutoksista, vaikka sukkessio onkin varttuneissa metsissä jo hidasta. Uudistushakatuissa metsissä muutokset olivat huomattavia, mutta myös muut hakkuut aiheuttivat kasvillisuuteen muutoksia. Siten on todennäköistä, että metsätalouden aikaansaamat kasvillisuusmuutokset ovat niin suuria, että klusterointimenetelmillä on vaikea erottaa käsiteltyjen metsien aineistosta mahdollisesti jo tapahtuneita ilmastonmuutoksen aiheuttamia kasvillisuusmuutoksia.

Ilmaston muuttumisella on suorien vaikutusten lisäksi monia epäsuoria, puuston rakenteen ja toiminnan kautta tapahtuvia vaikutuksia. Kiihtynyt puuston kasvu saattaa vaikuttaa aluskasvillisuuteen sukkessiota nopeuttamalla, kun esim. valaistus, neulaskarikkeen määrä ja laatu sekä latvussadanta muuttuvat varhaisemmin varttunutta metsää muistuttavaksi. Borealiselle vyöhykkeelle ennustettu muutaman asteen lämpötilan nousu lisää typen mineralisaatiota metsämaassa. Koska borealisissa metsissä typpi rajoittaa kasvien kasvua, voidaan ennustaa, että ne lajit, jotka pystyvät tehokkaimmin hyödyntämään lisätypen kasvussaan, lisääntyvät ja saavat kilpailuetua. Tällaisia lajeja ovat heinät ja ruohot. Myös varvut hyötyvät lisätypestä, mutta ne kasvavat hitaammin ja varastoivat typpeä rakenteisiinsa.

Hakkuista johtuvat aluskasvillisuuden muutokset ovat voimakkuudeltaan sellaista suuruusluokkaa, että mitä todennäköisimmin metsien käsittely tulee myös muuttuvassa ilmastossa olemaan vaikutuksiltaan huomattavin kasvillisuutta muokkaava tekijä.

Kirjoittajat: *Hannu Ilvesniemi, Pasi Rautio, Maija Salemaa ja Tiina Tonteri*

- Hankkeen vetäjä: professori [Hannu Ilvesniemi](#)
- Muut tutkijat: Veikko Kitunen, Leila Korpela, Kaisu Leppänen, Pasi Rautio, Maija Salemaa, Johanna Tanner ja Tiina Tonteri
- Hanke 3490: [Ilmastonmuutoksen vaikutukset metsäkasvien levinneisyysalueisiin ja kasviyhteisöjen rakenteeseen Suomessa](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[+ Takaisin raportin sisältöön](#)

[+ Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036205>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Fenologiset seurannat antavat tietoa ilmaston muuttumisesta

Ilman keskilämpötila on kohonnut maailmanlaajuisesti 1900-luvulla (IPCC 2001). Lämpeneminen on ollut voimakkainta pohjoisilla leveysasteilla, ja ilmiön on ennustettu voimistuvan. Tätä vahvistaa kaukana teollisista päästölähteistä Mauna Loa -vuoren huipulta Havajilta vuodesta 1958 alkaen mitattu ilman hiilidioksidipitoisuuden yhtäjaksoinen ja edelleen jatkuva kohoaminen.

Boreaalisella vyöhykkeellä ilman lämpötilan nousun vaikutus kasvien vuosirytmiiin eli fenologiaan on merkittävimpiä metsäekosysteemeihin vaikuttavia tekijöitä. Pitkät fenologiset aikasarjat ja mallintaminen ovat yksi keino saada tietoa metsäekosysteemeissä tapahtuvista muutoksista.



Kuva: Jouni Hyvärinen

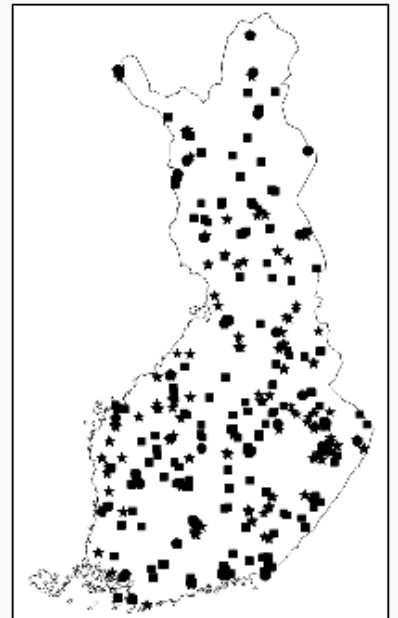
Metla perusti valtakunnallisen fenologisen havaintoverkon vuonna 1996 yhteistyössä valtion muiden tutkimuslaitosten, yliopistojen ja Metsähallituksen kanssa (Kuva 1). Valtakunnallinen havaintoverkko liittyy Euroopan laajuiseen PEP-ohjelmaan.

Seurantaverkon avulla tutkitaan metsäpuilla ja -marjoilla vuosittain toistuvia kasvutapahtumia kuten lehteentuloa, kukintaa ja pituuskasvua. Havainnot tehdään kahdesti viikossa koko kasvukauden ajan. Seurattavat ilmiöt vaihtelevat kasvilajeittain ([feno-opas 2007](#), pdf). Vuodesta 2007 lähtien havainnointi on tapahtunut puukohtaisesti tai kasvuruuduittain, jotta tulosten analysointi olisi riittävän luotettavaa. Havaintojen lisäksi tehdään kokeellista tutkimusta, josta saadaan tietoa muutosten taustalla vaikuttavista tekijöistä.

## Kasvifenologinen seurantatutkimus: keväiset kasvutapahtumat aikaistuneet

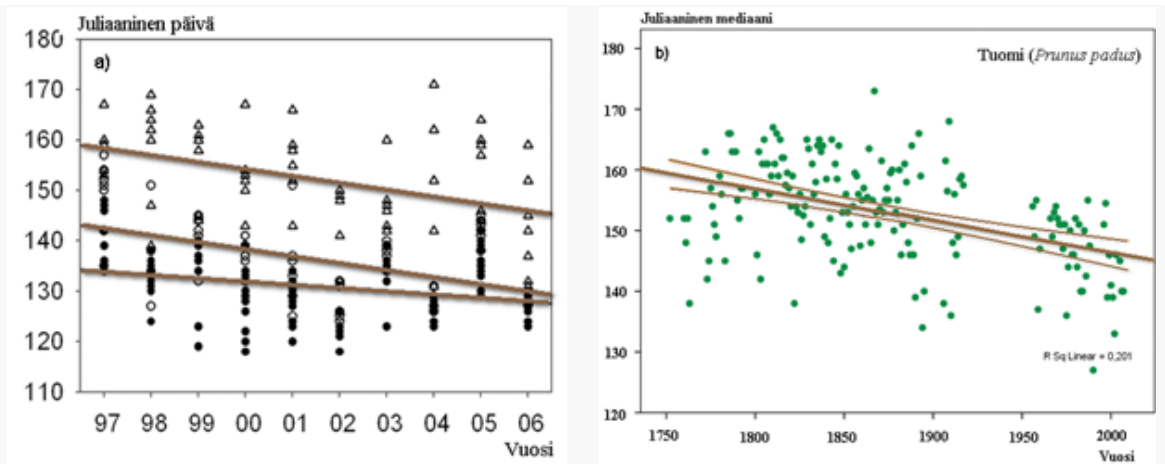
Fenologisen havaintoverkon tulosten mukaan esimerkiksi hieskoivun lehteentulo aikaistui selvästi Suomessa vuosina 1997–2006 (Kuva 2a). Myös muiden seurannassa mukana olevien puulajien monet keväiset kasvutapahtumat aikaistuivat saman seurantajakson aikana.

Esimerkiksi tuomen kukinta aikaistui keskimäärin 1,1 vrk/vuosi, ja muutoksen suunta oli tilastollisesti merkitsevä. Kukinnan aikaistuminen oli voimakkainta maan keski- ja pohjoisosissa. Tuomen kukinnan ajoittumista säätelevät pääasiassa huhti- ja toukokuun keskilämpötilat. Esimerkiksi Pohjois-Suomessa huhtikuun keskilämpötila kohosi tutkimusjaksolla 5,3 astetta. Pitkän aikavälin tarkastelussa, joka ulottuu vuodesta 1752 viime vuosiin (Kuva 2b), tuomen kukkimisen on havaittu aikaistuneen viisi vuorokautta sataa vuotta kohti.



Kuva 1. Kasvifenologinen havaintoverkko, marja- ja sienisatojen seurantametsiköt ja metsäpuiden siemensatojen tarkkailumetsiköt tutkimuksen alkuvaiheessa.

Metlan fenologisesta havaintoverkostosta koostettujen tulosten seuranta-aika oli lyhyt eli vähän yli kymmenen vuotta, mutta sen tulokset ovat yhteneviä edellä mainitun pitkän havaintojakson havaintojen kanssa. Vastaavanlaisia tuloksia on raportoitu myös muista Euroopan maista.



Kuva 2. a) Vasemmassa kuvassa hieskoivun lehteentulon aikaistuminen vuosina 1997–2006. b) Oikeassa kuvassa tuomen (*Prunus padus*) kukinnan ajoittuminen 1752–2007.

Kasvifenologisen seurannan ohessa on analysoitu myös työttötiaisen pesintäfenologian ajallista ja paikallista vaihtelua yhteistyössä Turun ja Helsingin yliopistojen kanssa. Tulosten perusteella työttötiainen, joka on yksi tyypillisimpiä havumetsälintujamme, munii nykyään yhdeksän vuorokautta aikaisemmin kuin 1960-luvulla ja kuusi vuorokautta aikaisemmin kuin 1920- ja 1930-luvuilla. Muutos selittyy pitkälti maalisi- ja huhtikuun kohonneilla lämpötiloilla.

## Marja- ja sienisatoennusteet pohjautuvat eri puolilla Suomea sijaitseviin havaintoruutuihin



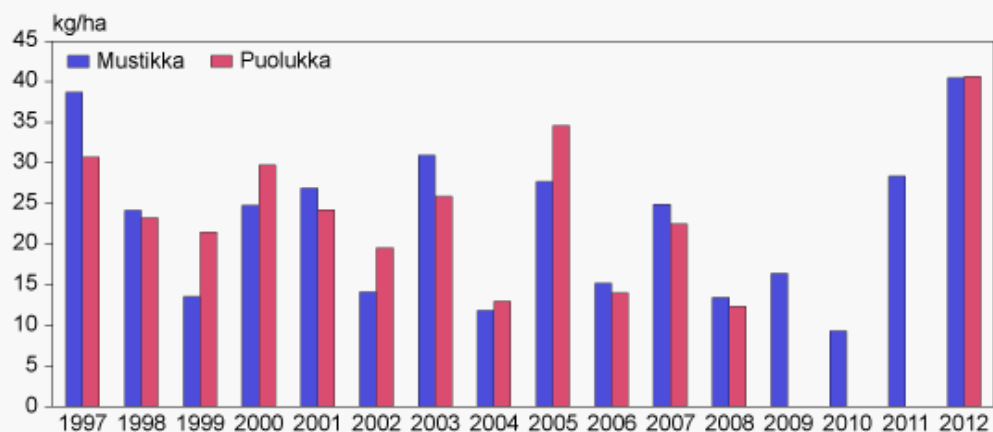
Kuva: Metla/Erkki Oksanen

Marja- ja sienisatojen seurannassa ovat mukana taloudellisesti tärkeimmät marjalajit, puolukka, mustikka ja suomuurain, sekä 30 kauppasienilajia. Viime vuosina mustikan ja puolukan tutkimusmetsiä on ollut 100 ja niissä yhteensä 500 neliömetrin kokoista koeruutua, joilta mustikan ja puolukan kukat, raakileet ja kypsät marjat on laskettu kolme kertaa kasvukauden aikana. Suomuuraimen tutkimussoita on noin 30 (150 koeruutua).

Maastossa laskettu tieto lähetetään välittömästi internetin tai puhelimen välityksellä tietokantaan ja tieto käsitellään Joensuussa. Laskennan pohjalta laaditaan 3–4 valtakunnallista [marja- ja sienisatotiedotetta](#), joissa arvioidaan marjalajien kukinnan ja kypsymisen aikataulu, marjalajien satotasot, määrään vaikuttavat tekijät ja minkälaisille kasvupaikoille parhaat sadot muodostuvat. [Marja- ja sienisatoennusteet](#) on koottu Metinfoon.

Tiedotteiden avulla pyritään lisäämään marjojen ja kauppasienten poimintaa sekä rohkaisemaan suomalaisia marjojen ja sienten käyttöön. Marjojen- ja sienten poiminta on myös hyvä liikuntaharrastus ja edistää terveellisiä elämäntapoja. Lisäksi lapsille ja nuorille se on oiva tapa oppia ymmärtämään oman marja- ja sienimetsän ominaisuudet osana ympäristökasvatusta.

Eri puolille maata perustetun koelaverkoston avulla on selvitetty vuosina 1997–2008 mustikan ja puolukan valtakunnalliset keskiarvosadot (kg/ha) eri metsätyyppien koaloilla (Kuva 3) sekä valtakunnalliset ja alueelliset kokonaissadot. Tutkimuksen mukaan mustikan vuotuinen sato vuosina 1997–2008 on vaihdellut 92 miljoonasta kilosta 312 miljoonaan kiloon ja puolukan vuotuinen sato 129 miljoonasta kilosta 386 miljoonaan kiloon.



Kuva 3. Valtakunnalliset mustikkasadot (kg/ha) 1997–2011 ja puolukkasadot 1997–2008 eri metsätyyppien koaloilla.

Seurantojen ohella on tutkittu myös marjasatoja ja niiden hyötyarvoja erityyppisissä metsissä. Monimuuttujamallin avulla on selvitetty tasaikäisrakenteisen ja eri-ikäisrakenteisen mustikka- ja puolukkatyyppin talousmetsän hyötyjä optimoimalla puutavaran, mustikkasatojen ja hiilen hintoja ja hyötyarvoja. Eri-ikäisrakenteisen metsän hyödyt olivat suuremmat kaikilla kolmella osa-alueella (mustikkasadot, puutavara, hiili) kuusi- ja mäntymetsässä, paitsi hiilen hyötyarvo mäntymetsissä. On myös osoitettu, että mustikan poimintatulot voivat vaikuttaa optimaaliseen hakkuuohjelmaan.

## Puiden siemensatoennusteista apua metsänuudistamisen suunnitteluun



Kuva: Metla/Essi Puranen

Puiden siemensatoseurannan tutkimusaineistot perustuvat professori Risto Sarvaksen vuonna 1958 käynnistämiin siemen- ja karikesatotutkimuksiin sekä vuodesta 1979 lähtien siemensadon tarkkailumetsiköissä tehtäviin havaintoihin. Siemensatoennusteita varten tehdään vuosittain eri puolilta Suomea kukinta- ja käpyhavainnot sekä kerätään silmu- ja käpynäytteitä.

Männyn ja kuusen siemensatojen ennustaminen perustuu kolmeen eri vaiheeseen: syystalvella mikroskooppisesti tutkittaviin silmunäytteisiin, keväällä tarkkailumetsissä tehtäviin kukintahavaintoihin ja syyskesällä samojen puiden käpyjen määrän laskentaan. Hies- ja rauduskoivulla ennusteet perustuvat syksyllä tehtäviin hedekukkahavaintoihin. Metsäpuiden ajallisia ja paikallisia siemensadon

vaihteluita sekä niiden yhteyttä ilmaston lämpenemiseen tutkitaan edellä mainittujen siemen- ja karikesatoaineistojen avulla. Analyysien perusteella laaditaan empiiriset mallit, joilla pystytään laskemaan ennusteita männyn ja kuusen siemensadoille.

Kuuselle ja männylle on laadittu kolme koko maan kattavaa siemensadon ennustemallia, jotka perustuvat kukkimista edeltävien kahden kasvukauden sääennustuksiin. Mallien avulla on mahdollista laatia alustava, ensimmäisen vaiheen siemensatoennuste, joka ulottuu kuusella 1,5 ja männyllä 2,5 vuoden päähän. Uudet, säätekijöihin perustuvat ennustemallit tarjoavat merkittävän lisän metsäpuiden siemensatojen ennustamiseen. Ennusteet helpottavat siemenkeräyksen ja niiden rahoituksen suunnittelua sekä toimivat apuvälineenä metsänuudistamisratkaisuja tehtäessä. Ennusteita voidaan hyödyntää tehtäessä päätöksiä metsänuudistamistavasta tai luontaisen uudistamisen ajoittamisesta siemensatojen perusteella.

Pohjois-Suomessa esiintyy harvoin, noin kerran kymmenessä vuodessa sellaisia vuosia, jolloin männyn siemensato on samanaikaisesti sekä määrällisesti että laadullisesti hyvä. Jos kasvukauden lämpöolot tulevaisuudessa kohoavat, laadullisesti hyvät männyn siemenvuodet voivat yleistyä Pohjois-Suomessa, koska lämpötila on siellä tärkein siementen tuleentumiseen vaikuttava tekijä. Vuodesta 1960 alkaneissa siemensatosarjoissa ei ollut havaittavissa trendinomaisia piirteitä.

Kirjoittajat: *Eero Kubin, Jarmo Poikolainen, Kauko Salo, Tatu Hokkanen, Jorma Pasanen ja Anne Tolvanen*

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Eero Kubin](#)
- Muut tutkijat: Jaakko Heinonen, Tatu Hokkanen, Risto Häkkinen, Outi Manninen, Jarmo Poikolainen, Kauko Salo, Eira-Maija Savonen, Eila Tillman-Sutela ja Anne Tolvanen
- Hanke 3517: [Metsäkasvien fenologia ja satoennusteet muuttuvassa ilmastossa](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)
  
- [Metinfo - Fenologia](#)
- [Marjojen ja sienten satoennusteet](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036206>

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

[MIL-kotisivu](#)

[Loppuraportti](#)

[Raportin sisältö](#)

### Lisääntyvätkö patogeenisienten aiheuttamat metsätuhot tulevaisuuden ilmastossa?

Monien metsätautien oletetaan aiheuttavan aiempaa enemmän tuhoja, mikäli ilmastomme muuttuu ennusteiden mukaisesti. Lisääntyvät talvisateet ja yhtäjaksoisten pakkaskausien lyheneminen edistävät sienitautien leviämistä. Lämpötilan noustessa ja kesän hellejaksojen yleistyessä veden haihdunta metsissä lisääntyy, jolloin kuivilla kankailla puut voivat kärsiä nykyistä enemmän kuivuudesta. Tämä voi lisätä niiden alttiutta sairastua tauteihin.

Taudinaiheuttajamikrobien uskotaan mukautuvan muuttuvissa ilmasto-oloissa puita nopeammin lyhyemmän elinkiertonsa ansiosta. Sitä ei kuitenkaan tiedetä, missä määrin sienet ovat mukautuneet paikallisiin ilmasto-oloihin ja missä määrin ne voivat mukautua kaukokulkeutuvan geenivirran myötä olosuhteiden muuttuessa. Alueilla, joilla vedenpuute ei muodostu rajoittavaksi tekijäksi, kasvukauden pidentyminen ja lämpötilojen nousu edistävät sienten ja myös puiden kasvua. Kumpi osapuoli hyötyy lämpötilan noususta enemmän, puut vai patogeenisienet?



Tervasrosaa aiheuttavan sienen helmi-itiöpesäkkeitä männyn rungolla. Kuva: Metla/Juha Kaitera

### Sienipopulaatioiden sisäinen vaihtelu edistää sopeutumista ilmastomuutokseen

Tutkimme kahden kuusen patogeenisienien, kuusenjuurikäävän ja kuusenlymyharjakan, sopeutumista nykyisiin ja muuttuviin ilmasto-olosuhteisiin. Kuusenjuurikäävä on taloudellisesti merkittävin patogeenisieni Suomessa ja kuusenlymyharjaka taloudellisesti merkityksetön, mutta erittäin yleinen kuusen neulasissa elävä mikrosieni. Tutkimuksessa kerättiin sienikantoja ilmastoltaan erilaisilta alueilta Euroopasta ja myös Keski-Siperiasta. Niiden perinnöllistä muuntelua sekä lämpötilan vaikutusta kasvunopeuteen määritettiin laboratorio-oloissa.

Tulokset osoittivat, että vaihtelu paikallisen populaation sisällä on suuri, ja se ilmenee sekä sienten aktiivisuudessa että perimässä. Ilmastoltaan erilaisilta alueilta peräisin olevien sienikantojen välinen geneettinen vaihtelu on vähäinen: 2–5 % kokonaisvaihtelusta. Monet puiden sienet tulevat siten mukautumaan hyvin ilmastomuutokseen suuren paikallisen muuntelun ja myös muualta tulevan geenivirran ansiosta. Tulos tukee arvioita, että sienitautien aiheuttamat tuhot lisääntyvät metsissä, jos ilmasto muuttuu ennustetulla tavalla.

### Suomeen ei ole tullut uusia männyn ja kuusen metsäpatogeneja viime vuosina

Suomessa on todettu useita uusia puiden patogeeneja viimeisten kahdenkymmenen vuoden aikana. Vuonna 2008 Suomessa havaittiin ensi kertaa männyn punavyökaristetta, joka aiheutti neulasten ruskettumista lähinnä tiheissä männyn taimikoissa. Suomessa punavyökaristeen populaatio on geneettisesti hyvin monimuotoinen verrattuna keskieurooppalaiseen populaatioon. Tämä viittaa siihen, että punavyökariste on ollut maassamme jo vuosikausia ja elänyt männyissämme niin lievästi tautina, ettei siihen ole aiemmin kiinnitetty huomiota. Vuosituhannen alun pitkät kosteat syksyt ja lauhat talvet ovat todennäköisesti suosineet tätä tautia niin, että se havaittiin monen muun männyn karistetaudin rinnalla.

Kaksi vuotta punavyökaristeen ensihavaintojen jälkeen vuonna 2010 Etelä-Suomessa löydettiin vuorimännystä ja metsämännystä valkovyökaristetta (*Cyclaneusma minus*). Tämäkin sienilaji on mahdollisesti esiintynyt maassamme jo pitempään. Virossa esiintyvää männyn ruskovyökaristetta (*Mycosphaerella dearnessii*) ja männynlämsätauti aiheuttavaa *Diplodia pinea* -sientä ei ole voitu toistaiseksi osoittaa DNA-määrittelyillä Suomesta.

Olemassa olevan tiedon perusteella Suomeen ei ole toistaiseksi tullut yhtään uutta metsäpuilla taudin aiheuttavaa sienilajia, joiden voisi olettaa saapuneen maahan viime vuosikymmenien aikana tapahtuneiden ilmastollisten muutosten seurauksena.

## Juurikäätä on merkittävin metsäpatogeeni Suomessa

Juurikäätä on merkittävin metsäpatogeeni Suomessa ja aiheuttaa vuosittain noin 50 miljoonan euron taloudellisen tappion metsätaloudelle. Sienen hengitysaktiivisuuden lämpötilavastekäyrän perusteella arvioitiin juurikäävän menestymistä tulevaisuuden ilmastossa kolmessa ilmastoltaan erilaisessa kuusikossa Pohjois-Suomessa, Etelä-Suomessa ja Pohjois-Saksassa.

Tulosten mukaan ilman keskilämpötilan noustessa esimerkiksi 6 °C:lla sienen vuotuinen kokonaisaktiiviteetti kasvaisi Etelä-Suomessa 67 %:lla ja Pohjois-Suomessa 109 %:lla nykyiseen verrattuna. Huolimatta juurikäävän aktiiviteetin kaksinkertaistumisesta Pohjois-Suomessa, se ei ylittäne samanaikaista puuston kasvun lisäystä muun muassa siksi, että pohjoisessa veden arvioidaan riittävän kasvillisuudelle ilmaston lämmentyäkkin.

Sen sijaan Etelä-Suomessa juurikäävän aktiiviteetti kiihtyisi merkittävästi enemmän kuin puuston kasvu. Lahottajasienet eivät kärsi puiden lailla veden puutteesta kuivien hellejaksojen aikana, sillä elävässä puuaineksessa on niille aina riittävästi kosteutta. Kesäaikaisten metsänhakkuiden lisääntyminen talvien lyhentessä johtaa myös pohjoisessa juurikäävän leviämiseen ja vahinkojen lisääntymiseen.

Juurikäävän torjuntaa on tehostettava juurikäävän itiölevinnän torjumiseksi. Kantokäsittely tulisi tehdä aina havupuiden hakkuiden yhteydessä koko maassa lukuun ottamatta pohjoisinta Lappia. Kantokäsittely on tärkeää myös alueilla, joilla juurikäätä ei vielä esiinny.

## Väli-isännillä on tärkeä rooli männyn tervasrosan leviämisessä

Tervasroso on lisääntynyt viime vuosikymmeninä Pohjois-Suomessa. Tervasrosaa aiheuttava *Cronartium flaccidum* -sieni leviää mäntyyn väli-isäntäkasvien avulla. Väli-isäntäkasveja on tavattu useista eri kasvisuvuista, joista maitikat ovat tärkeimmät. On arveltu, että tervasrosan viimeaikainen lisääntyminen selittyisi ilmastotekijöillä. Ilmasto voi vaikuttaa suoraan sienen infektiivisyyteen tai välillisesti taudin käyttämien väli-isäntien runsauden ja lajimäärien muutosten kautta.

Kasvillisuuskoealoilta eri puolilla Suomea tehdyissä tutkimuksissa tervasrosaa löydettiin kaikilta maitikkalajeilta, mutta yleisimmin sitä esiintyi metsämaitikalla. Satunnaisesti sientä esiintyi myös kangas- ja lehtomaitikalla. Sieni ei esiintynyt runsaana millään maitikkalajilla.

Laboratoriotutkimuksissa testatuista 80 kasvilajista, jotka edustivat 18 eri kasviheimoa, löytyi 32 altista väli-isäntäkasvia 12 heimosta. Osa niistä on aikaisemmin tuntemattomia väli-isäntiä. Sienen väli-isäntäkasvilajisto on siten aikaisemmin luultua huomattavasti laajempi. Osa laboratoriokeissa havaituista uusista väli-isäntäkasveista kasvaa Suomen luonnossa yleisenä. Näitä lajeja esiintyy etenkin *Euphrasia*-, *Bartsia*- ja *Veronica*-suvuissa, joiden joukosta saattaa löytyä myös tervasrosaa levittäviä lajeja.

Tervasrosan leviämispotentiaali on suurin metsämaitikalla etenkin Pohjois-Suomessa. Rehevät tuoret mäntykankaat, joissa metsämaitikka kasvaa yleisenä, ovat riskialtimpia taudille. Tämä tulisi ottaa huomioon männyn viljelyssä jo suunnitteluvaiheessa. Taudin leviämisen ehkäisemisessä tulee kiinnittää huomiota etenkin metsämaitikan esiintymiseen viljelyaloilla.

## Miten tautiriskit otetaan huomioon metsätaloudessa?

Tautien torjuntaan tulee kiinnittää aiempaa enemmän huomiota. Hyviksi koettujen metsänhoitokäytäntöjen merkitys kasvaa. Keskeiset keinot ovat sopivan puulajin ja alkuperän valinta metsää uudistettaessa sekä suositusten mukainen taimikonhoito ja oikea-aikaiset nuorten metsien harvennukset. Lisäksi metsien puulajiston yksipuolistumista tulee välttää eli kuusen ja männyn kustannuksella tulisi metsiä uudistaa nykyistä useammin kotimaisilla lehtipuilla ja lehtikuusella. Juurikäävän torjunta kantokäsittelyllä tulee ulottaa koko maahan lukuun ottamatta pohjoisinta Lappia. Pahasti juurikäävän saastuttamat kuviot kannattaa uudistaa lehtipuilla siellä, missä hirvikanta tämän sallii. Uusien juurikäävän torjuntakeinojen tutkimukseen on panostettava huomattavasti. Männyn viljelyssä reheville mäntykankaille tulisi huomioida tervasrosan leviämiskäytännön etenkin Pohjois-Suomessa.

Ilmastonmuutoksen ja lisääntyvän kansainvälisen taimikaupan yhteisvaikutuksesta riski saada uusia taudinaiheuttajia maahan lisääntyy merkittävästi. Ulkomailta tuotettujen taimien käyttöä metsänuudistamisessa tulee välttää. Koristekasvien maahantuonti tulisi mieluiten lopettaa kokonaan sen metsien terveydelle aiheuttaman suuren riskin vuoksi. Kansainvälinen metsäpatologioiden yhteisö esitti vuonna 2011 tästä aiheesta vetoamuksen, joka on julkaistu verkossa nimellä [Montesclaros declaration](#).

Kirjoittajat: *Michael Müller* ja *Juha Kaitera*

- Hankkeen vetäjä: vanhempi tutkija [Michael Müller](#)
- Muut tutkijat: Jarkko Hantula, Juha Kaitera ja Martti Vuorinen
- Hanke 3437: [Männyn ja kuusen patogeenisienien sopeutuminen paikalliseen ilmastoon sekä](#)

kaukokulkeutuminen

- [Hankkeen julkaisut](#)

[← Takaisin raportin sisältöön](#)

[↑ Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036207>

Päivitetty: 30.10.2012 /KPB/SJor

| [Copyright Metla](#) | [Palaute](#)

---

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Ilmastonmuutos voi lisätä hyönteisten aiheuttamia metsätuhoja

Pohjois-Euroopan metsäpuilla elää useita satoja hyönteislajeja, joista vain pieni osa on merkittäviä tuholaisia. Koska tuholaislajien kannanvaihteluihin voivat vaikuttaa hyvin erilaiset tekijät, myös ilmastonmuutos vaikuttanee eri lajeihin eri tavoin. Hyönteisten aiheuttamien metsätuhojen riski voi kasvaa ilmaston muuttumisen ja muiden ympäristömuutosten seurauksena.



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

### Kirjanpainajatuhot uhkaavat kuusikoita

Kesän 2011 jälkeen Etelä- ja Kaakkois-Suomessa on havaittu aiempaa enemmän kirjanpainajan tappamia pystypuita. Ilmastonmuutokseen liittyvät kirjanpainajan sukupolvien määrän lisääntyminen, kuivuus ja mahdollisesti yleistyvät myrskytuhot lisäävät laajempien kirjanpainajatuhojen riskiä kuusikoissa.

Kirjanpainajatutkimuksessa metsiin jätetyt enintään 20 kaatuneen kuusen ryhmät eivät lisänneet seuraustuhojen riskiä. Hieman suurempienkaan kuusiryhmien jättäminen metsään ei aiheuttane suurta puukuolleisuutta talousmetsissä. Kolin kansallispuiston ennallistamiskokeissa kirjanpainajasaaliit vähintään kaksinkertaistuivat ensimmäisenä käsittelyiden jälkeisenä kesänä. Nykytilanteessa, jossa kirjanpainajatuhojariski on sääolojen (myrskyt, lämpimät kesät, kuivuus) vuoksi lisääntynyt, on syytä pidättäytyä lahopuun tuottamisesta kuusikoissa, ellei kirjanpainajien torjuntaa voida toteuttaa.

Kuusen neulasia syövät hyönteiset eivät ole aiheuttaneet merkittäviä tuhoja maassamme. Kuusta ravintonaan käyttävistä tulokaslajeista havununna on runsastunut 2000-luvulla Etelä-Suomessa, mutta toistaiseksi sen aiheuttamia tuhoja ei ole maassamme havaittu. Keski-Euroopassa laji aiheuttaa haittaa etenkin ylitiheissä metsiköissä, joten ajallaan tehdyt harvennukset vähentävät havununnan aiheuttaman tuhon riskiä.

### Rusko- ja pilkkumäntypistiäiset ovat männyn pahimpia tuholaisia

Ruskomäntypistiäisen aiheuttamia tuhoja esiintyy harvoin Itä- ja Pohjois-Suomessa, koska latvustossa talvehtivat munat eivät kestä alueella usein esiintyviä kovia pakkasia.

Toinen maassamme merkittävä männyn tuholainen on pilkkumäntypistiäinen, joka talvehtii kotelovaiheessa maaperässä suojassa pakkasilta. Mäntypistiäistuhot esiintyvät yleisimmin kuivilla ja karuilla kasvupaikoilla sekä tietyn ikäisissä metsiköissä, mitkä tekijät voidaan huomioida tuhoriskejä arvioitaessa.

### Kekomuurahaiset syövät tuohyönteisiä

Kekomuurahaiset ovat useiden tuohyönteisten vihollisia, ja sen vuoksi vähentävät useiden tuholaisien kannanvaihteluita. Muurahaisilla on paljon muitakin vaikutuksia metsäekosysteemeissä. Kekomuurahaiset lisäävät paikallista vaihtelua hiilen, ravinteiden, juurten sekä selkärangattomien eläinten määrissä, mutta kekojen osuus metsikön hiili- ja ravinnevarastoista on pieni. Muurahaisten hoitamien kirvojen imennän vaikutus kuusen kasvuun oli tutkimuksessa metsikkötasolla merkityksetön.

### Ilmaston lämpeneminen uhka Lapin tunturikoivikoille

Puutavaran ja muun materiaalin mukana voi tulla uusia tuholaislajeja. Näiden havaitseminen mahdollisimman nopeasti on tärkeää, koska tällöin tuholaisien hävittäminen voi vielä olla mahdollista. Euroopan ja Välimerenmaiden kasvinsuojelujärjestön EPPOn riskiarvion mukaan lisääntynyt hakkeen tuonti on kasvattanut Pohjois-Amerikassa koivujen tuholaisena esiintyvän *Agilus anxius* -kovakuoriaisen riskiä saapua Eurooppaan.

Koivuilla on yleisesti ottaen hyvä kyky sopeutua ilmastonmuutokseen. Koivun kemiallinen puolustus on pitkälti perinnöllisesti määräytynyttä, eikä se ole kovin herkkä elottomien ympäristötekijöiden vaihtelulle. Talvilämpötilojen vaihtelu onkin tärkein yksittäinen ympäristötekijä, joka vaikuttaa koivua syövien perhoslajien kannanvaihteluihin.

Ilmaston lämpeneminen muodostaa Lapin tunturikoivikoille uhan, koska tunturi- ja hällamittarit hyötyvät kohoavista talvilämpötiloista. Tunturikoivikoiden laajuutta supistaa myös männyn eteneminen tuntureille ilmaston lämmitessä: viimeisen 200 vuoden aikana männyn puuraja on Länsi-Lapissa edennyt pohjoiseen yli 20 kilometriä.

Kirjoittaja: *Seppo Neuvonen*

- Hankkeen vetäjä: erikoistutkija [Seppo Neuvonen](#)
- Muut tutkijat: Timo Domisch, Jouni Kilpeläinen, Kari Mikkola, Heikki Nuorteva ja Teemu Saikkonen
- Hanke 3438: [Metsien tuhohyönteisten aiheuttamien riskien arviointi ja hallinta muuttuvassa ympäristössä](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036208>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Miten ilmastonmuutos heijastuu myyriin ja hirvieläimiin?

### Pikkujyrsijät

Myyrät ovat olennainen osa pohjoista selkärangaisyyhteisöä. Ne ovat elintärkeää saalista monelle petolajille, ne muokkaavat kasvillisuutta ja lisäksi ne voivat levittää tauteja ihmisiin. Myyrät ovat myös yksi merkittävimmistä metsäpuiden taimikoiden tuholaisista. Runsaimmillaan myyrät voivat tuhota miljoonia taimia tuhansien hehtaarien aloilta.

Myyräkannat vaihtelevat monilla alueilla 3–4 vuoden säännöllisissä jaksoissa eli sykleissä, joita aiheuttavat petojen saalistus, talviravinnon puute ja mahdollisesti taudit. Myyrien kannanvaihtelut ovat heikentyneet viimeksi kuluneiden parin vuosikymmenen aikana monin paikoin eri puolilla maailmaa.



Kuva: Pekka Voipio

### Myyrien kannanvaihteluissa muutoksia

Myyrien kannanvaihteluiden heikkenemiselle on esitetty useita hypoteeseja, joista toistuvimmin on ollut ilmastonmuutos. Varsinkin talvien leudontumisen ja lumisen kauden lyhentymisen on katsottu heikentävän myyräsyklejä. Joillakin alueilla on jo havaittu myyräsykliä heikkenemistä, ja ne on voitu kohtalaisen luotettavasti kytkeä muuttuneisiin talviolosuhteisiin.

Ilmastonmuutos voi vaikuttaa myyrien kannanvaihteluihin joko suorasti tai epäsuorasti ravintoketjun tasojen (kasvit, myyrät, pedot, taudit) vuorovaikutusten kautta. Muuttuvat ilmasto-olot voivat vaikuttaa joko nisäkäsyhteisöjen monimuotoisuuteen, erilaisten saalis- ja petotyyppien moninaisuuteen, myyriä saalistavien petojen lisääntymis- tai saalistusmenestykseen tai myyrien käyttämien ravintokasvien levinneisyyteen, runsauteen tai ravinnolliseen laatuun ja tätä kautta myyriin.

Tutkimustulostemme mukaan ilmastonmuutos on vaikuttanut myyriä ravinnokseen käyttävien petolintujen populaatioekologiaan. Hiirihaukan lisääntymisaika on varhaistunut suotuisten ilmasto-olojen ansiosta, mutta samaan aikaan poikastuotto on pienentynyt poikasvaiheen epäedullisten ilmasto-olojen vuoksi. Tämä on osaltaan vaikuttanut hiirihaukan populaatiokoon voimakkaaseen pienenemiseen 1970-luvulta lähtien. Suomessa pesivien pöllölaajien lisääntymisen ajoitukseen ja -menestykseen säätekijöillä on liki yhtä paljon vaikutusta kuin myyrärunsaudella. Myyriä syövien petojen runsausmuutokset vaikuttavat myös myyrien dynamiikkaan ja tätä kautta myyrien aiheuttamien tuhojen määrään.

**Selvitimme myös ilmastotekijöiden suoraa vaikutusta myyrien kannanvaihteluihin.** Tutkimuksissa on havaittu, että myyrädynamiikan ajalliset muutokset vaihtelevat alueittain. Pohjoisessa vaihtelun voimakkuus heikkeni 1980-luvun puolenvälin jälkeen, ja hallitseva monivuotinen syklistyys muuttui selvästi vuodenaikaisemmaksi vaihteluksi. Mutta pohjoisessa syklit ovat viime vuosina jälleen voimistuneet, ja seurauksena ovat olleet esimerkiksi Lapin hurjat metsätuhot talvella 2010–2011. Eteläisessä Suomessa myyrien kannanvaihtelut ovat voimistumassa 2000-luvulla. Itä-Suomessa sykli näyttää hävinneen kokonaan.

Kevään ja kesän lämpötilojen nousu voi selittää eri alueilla esiintyvät dynamiikan eri suuntaiset muutokset. Muutokset myyrien kannankasvun tiheysriippuvuudessa korreloivat kevään ja kesän lämpötilojen kanssa; muutokset populaatiokasvussa taas korreloivat syksyn ja talven olosuhteiden kanssa.

Tämänhetkisen tietämyksen mukaan muuttuva ilmasto on aiheuttanut myyrien runsastumisen ja kannanvaihteluiden voimistumisen eteläisessä Suomessa. Kannanvaihtelut voivat voimistua myös keskeisessä ja

itäisessä Suomessa. Muutoksiin myötävaikuttanevat myös metsätalousmenetelmät ja niiden muuttuminen (paljaaksihakkuut ja sen jälkeinen heinittyminen) sekä myös maatalouden muutokset, kuten pakettipeltöjen määrän kasvu ja karjatalouden loppuminen. Nämä tekijät yhdessä uhkaavat johtaa myyrien aiheuttamien taimituhojen voimakkaaseen runsastumiseen Etelä-Suomessa.

On kuitenkin mahdollista, että ilmaston lämpenemisestä johtuva perustuotannon nousu lisää keskikokoisten petojen kantoja, ja sen seurauksena nykyisin vallitseva myyrien voimakas syklistyys voi kadota. Tässä tapauksessa myyrien suurimmat tiheydet jäisivät nykyistä huomattavasti alemmiksi, mikä puolestaan vähentäisi myyrien aiheuttamia syklisiä, ajoittaisia taimituhoja. Vastaavasti lieviä ja paikallisempia tuhoja voisi esiintyä jatkuvasti jonkin verran.

## Myyrät voivat rajoittaa mäntypistiäisten joukkoesiintymiä



Ruskomäntypistiäisen toukkia.

Mäntypistiäisten toukat syövät männynneulasia, ja toisinaan kehittyvät joukkoesiintymiä, jolloin männiköitä saatetaan syödä paljaaksi tuhansien hehtaarien alueella. Neulasten syönnistä seuraa kasvutappioita, puiden altistumista seuraustuhoille ja puiden kuivumista. Yksi tärkeimmistä mäntypistiäisten joukkoesiintymiä rajoittavista tekijöistä on myyrien ja päästäisten aiheuttama kotelosaalistus. Mitä enemmän saalistuspainetta pikkunisäkkäät saavat aikaan, sitä pienempi todennäköisyys on mäntypistiäisten joukkoesiintymiselle. Pikkunisäkkäiden eri mäntypistiäislajien kotelosaalistus tapahtuu eri vuodenaikoina. Yleisempi laji, ruskomäntypistiäinen, on kotelovaiheessa loppukesästä syksyyn, ja talvehtii munana männyn neulasissa. Pilkkumäntypistiäinen puolestaan talvehtii kotelona maassa.

Pikkunisäkkäiden runsastuminen ja kantojen vakaantuminen voi vaikuttaa ruskomäntypistiäisen määriin, koska kotelosaalistus tapahtuu lumettomana aikana. Tutkimme lisäksi lämpötilan vaikutusta metsämyyrien tekemään ruskomäntypistiäisten koteloiden saalistukseen. Tulokset osoittavat, että 5 °C:n lämpötilan nousu loppukesän-alkusyksyn olosuhteissa lisää kotelosaalistusta yli viidenneksen. Vaikka ilmastonmuutoksen on esitetty lisäävän mäntypistiäisten joukkoesiintymisen todennäköisyyttä, tulostemme mukainen myyräsaalistuksen samanaikainen lisääntyminen saattaa osaltaan hillitä pahimpia mäntypistiäistuhon.

Talvien lämpeneminen vaikuttaa lumen laatuun: lämpökaudet tiivistävät ja jäädyttävät lunta maata vasten, jolloin pikkunisäkkäiden pilkkumäntypistiäisten koteloihin talvella kohdistuva saalistus vaikeutuu tai jopa estyy. Tämä voi puolestaan lisätä pilkkumäntypistiäisten tuhoriskiä.

## Ei muutoksia myyrätuhojen torjuntasuositukseen

Ilmastonmuutos ei aiheuta muutoksia nykyisiin suositukseen myyrätuhojen torjunnasta. Suurin tuhoriski taimikoissa on silloin, kun myyrät ovat kannanvaihtelunsa huippuvaiheessa.

Jos metsänomistaja voi huomioida myyräsyklin vaiheen istutuksen ajankohdan valinnassa, suositellaan istuttamista vasta välittömästi huippuvaiheen jälkeen. Maanmuokkauksesta ja heinäntorjunnasta on huolehdittava, sillä näin vähennetään myyrien ravintoa ja suojaa. Istutusajankohdaksi suositellaan mieluummin kevättä kuin syksyä. Arvotaimia (muun muassa visakoivua ja tammia) istutettaessa suositellaan käytettäväksi taimisuojuja. Jos myyrätalvi uhkaa, voi kokeilla karkotteita tai myyränmyrkkysyöttejä. Hiirenloukuillakin saa vähennettyä myyräkantaa tehokkaasti.

## Myyrät välittävät ilmastonmuutoksen zoonooseihin

Jyrsijät, myyrät mukaan lukien, ovat lukuisten taudinaiheuttajien levittäjiä ja väli-isäntiä. Lisäksi jyrsijät toimivat lukuisten niveljalkaisten taudinlevittäjien, kuten puutiaisten ja kirppujen isäntinä. Jyrsijöiden dynamiikkaan vaikuttavat ilmastotekijät vaikuttavat isäntien kautta myös niiden levittämien tautien esiintymiseen ja dynamiikkaan. Metlan myyrätutkijat ovat tiiviisti johtotehtävissä eräissä EU:n suurissa ympäristönmuutokseen liittyvissä zoonooseja [tutkivissa projekteissa](#), ja MIL-ohjelmassa tehtävillä myyrien kannanvaihtelun ja ilmastokijöiden yhteyden mallien laatimisella on vahva yhteys tähän tutkimukseen.

Euroopassa parhaiten tutkittu zoonoosi-esimerkki on myyräkuume, jonka aiheuttaa metsämyyrän levittämä Puumala-virus. Myyräkuumeen epidemiologia vaihtelee melkoisesti eri puolilla Eurooppaa, mikä johtuu pohjimmiltaan alueellisten ilmastoerojen vaikutuksesta myyrien kannanvaihteeseen. EU-maista myyräkuumetta esiintyy eniten Suomessa. Lisäksi ilmasto vaikuttaa viruksen säilymiseen tartuntakykyisenä luonnossa: mitä kylmempää, sen paremmin virus säilyy. Ilmaston lämpeneminen saattaa vähentää myyräkuumeen esiintymistä Suomessa, koska metsämyyrien

### Zoonoosit

Tartuntatauteja, joiden aiheuttajat voivat siirtyä eläimistä ihmisiin ja päinvastoin kutsutaan zoonoosiksi. Zoonoosien aiheuttajin kuuluu erilaisia bakteereita, viruksia, alkueläimiä, loisia ja muita taudinaiheuttajia kuten prioni. Zoonoosit voivat tarttua suoraan tai välillisesti eläimen ja ihmisen välillä. Välillinen tartunta voi tapahtua esimerkiksi elintarvikkeiden, veden tai hyönteisten välityksellä. Monet ihmisten merkittävimmistä tartuntataudeista maailmassa ovat zoonoosia. Lähde:

<http://www.zoonoosikeskus.fi/portal/fi/zoonoosit>

kannanvaihtelut voivat tasaantua petoyhteisön monipuolistumisen vuoksi ja viruksen säilyminen luonnossa heikkenee.

Toinen myyriin liittyvä yleinen zoonoosi Suomessa on jänisrutto eli tularemia, joka on bakteeritauti. Ihmiset saavat tartunnan useimmiten loppukesällä hyttysten puremista, ja ihmisepidemiat (jopa 1 000 tapausta) esiintyvät vuosi myyrähuipun jälkeen. Myyrähuippu on ihmisepidemian välttämätön edellytys, mutta tekemämme ilmastoanalyysit viittaavat siihen, että liian lämmin ja kuiva tai kylmä ja sateinen kesä alentaa ihmistartuntojen määrää luultavasti siksi, että sellaiset kesät eivät suosi bakteeria levittäviä hyttysiä. On spekuloitu, että bakteeri leviää luontoon myyrien ulosteista, ja hyttystoukat saavat sen lammikoistaan.

Varsinkin metsämyyrät ja -hiiret ovat levittäjiä ja väli-isäntiä useille puutiaisten levittämille patogeeneille, joista mainittakoon puutiaisaivokuumevirus sekä *Borrelia*-bakteerit. Nämä patogeenit lisääntyvät jyrtsijöissä, mutta punkkien määrälle tärkeämpiä isäntiä ovat suuremmat nisäkkäät, kuten metsäkauriit. Niistä aikuiset punkkinaaraat saavat runsaasti verta ja sen turvin munivat paljon. Itse puutiaisiin ilmasto vaikuttaa voimakkaasti, ja määrää sen, miten samanaikaisesti eri-ikäiset puutiaiset esiintyvät, ja miten patogeenit siirtyvät vanhemmista puutiaisista nuorempiin jyrtsijöiden kautta. Kuten edellä todettiin, ilmastonmuutos vaikuttaa myyrädynamiikkaan, mutta se myös lisää isompine nisäkkäiden runsautta, mikä vaikuttaa puutiaisten määrään ja levinneisyyteen.

## Hirvieläimet

Ilmastomallien ennakoimat muutokset etenkin talven pituudessa ja lumisuudessa heijastunevat hirvieläinten elinpiirien käyttöön ja siirtymisiin uusille elinalueille, ja edelleen sitä kautta metsätuhojen määrään, laatuun ja jakaumaan. Lisäksi suurpetokannat ovat kasvamassa ja levittäytymässä voimakkaasti. On arvioitu, että muuttuvat ilmasto-olosuhteet johtavat monenlaisiin ravintoketjujen tasojen vaikutuksiin (trophic cascades; suurpedot-hirvieläimet-ravintokasvit). Nämä vaikutukset voivat monimutkaistaa merkittävästi hirvieläinlajien populaatiodynamiikkaa ja siten metsätuhojen määrän ennustamista. Lisäksi hirvieläinkantojen metsästyksen voimakkuuden vaihtelu vaikeuttaa metsätuhojen ennustamista.



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

Hirvieläinten ravinnonkäyttö voi merkittävästi muokata metsäekosysteemin rakennetta ja toimintaa. Suomessa hirvi on talousmetsiemme merkittävin vahinkojen aiheuttaja männyn ja koivun taimikoissa. Lisäksi erityisesti haapaan ja pihlajaan kohdistuvan ravinnonkäytön on arvioitu vaikuttavan metsien monimuotoisuuteen myös luonnonsuojelualueilla.

Metsä- ja valkohäntäkauriin sekä metsäpeuran merkitys vahinkoeläiminä ja metsäekosysteemin muokkaajina on ollut hirveä pienempi. Kuitenkin myös metsä- ja valkohäntäkauriit voivat hyödyntää erityisesti pieniä taimikoita ravinnokeeseen ja aiheuttaa merkittäviä vahinkoja. Metsä- ja valkohäntäkauriiden kantojen nousu ei hirven tavoin liity metsien rakenteeseen tapahtuneeseen muutokseen, vaan kyse on niiden siirroista luonnonolosuhteiden puolesta hyvin soveltuville alueille: valkohäntäkauris tuotiin Pohjois-Amerikasta 1930-luvulla ja metsäkauriin maansisäisiä siirtoja tehtiin Perämeren rannikolta ja Ahvenanmaalta Etelä-Suomeen 1980- ja 1990-luvuilla. Leudot talvet 1990-luvulla ja 2000-luvun alussa, ja varsinkin valkohäntäkauriin paikoin voimakas talviruokinta, lienevät myös edistäneet lajien levittäytymistä ja kantojen runsastumista.

Tutkimme erityisesti metsä- ja valkohäntäkauriin leviämiskykyä, ilmastotekijöiden sekä kasvi- ja petoyhteisöissä tapahtuvien muutosten vaikutusta hirvieläinten elinpiirien käyttöön, ja arvioitiin tätä kautta hirvieläinten merkitystä vahinkoeläiminä muuttuvassa ilmastossa. Tutkimusta varten metsä- ja valkohäntäkauriisiin kiinnitettiin gsm-gps-seurantapantoja.

## Hirvieläimet muuttuvassa ilmastossa: kauriit leviävät pohjoisemmaksi

Hirvi on sopeutunut hyvin Suomen nykyiseen ilmastoon, mutta metsä- ja valkohäntäkauriit elävät täällä levinneisyysalueensa rajalla. Lumipeitteen paksuus vaikuttaa selvästi molempien kaurislajien ravinnon ja elinympäristön valintaan ja selviämiseen talvesta. Valkohäntäkauris onkin menestynyt parhaiten Etelä- ja Länsi-Suomessa alueilla, jotka vastaavat lumipeitteen paksuuden ja kylmimmän kuukauden keskilämpötilan perusteella sen alkuperäaluetta Pohjois-Amerikassa.

Metsä- ja valkohäntäkauriiden seuranta tutkimuksessa lumen paksuudella on havaittu olevan selkeä yhteys elinpiirien kokoon. Erityisen selvästi lumipeitteen paksuneminen pienensi elinpiiriä pohjoisimmilla yksilöillä. Lumipeitteen paksuus on kriittinen tekijä talvesta selviämisessä. Pohjoisessa ravintoresurssit ovat huonommat, ja niiden tehokas hyödyntäminen edellyttäisi liikkumista laajemmalla alueella kuin lumiolot sallivat.

Lämpimämmät kesät ja talvet voivat aiheuttaa hirvellen energiaa kuluttavaa ja selviytymistä heikentävää lämpöstressiä, jonka seurauksena hirvikantojen painopiste siirtynee Suomessa vähitellen pohjoisemmaksi. On

kuitenkin huomattava, että lämpöstressin vaikutuksista hirviin on toistaiseksi ristiriitaisia tuloksia.

Hirvituhot ovat pahimmat talvina, jolloin lumipeite tulee aikaisin ja on runsas. Tällöin hirvet kokoontuvat pienille talvielinpiireille, jolloin pienikin hirvikanta aiheuttaa suuria paikallisia vahinkoja. Mikäli talvet muuttuvat vähälumisemmiksi, paikalliset vahinkokeskittymät vähenevät, koska hirvet pääsevät helpommin liikkumaan laajemmalla alueella. Tällöin syöntien vaikutukset jäävät lievemmiksi, mikäli hirvikannan koko on talviravintovaroihin nähden kohtuullinen.

Ilmastonmuutoksen todennäköisin vaikutus hirvieläimiin on talvien lauhtumisesta, lumipeitteen ohentumisesta ja lumisen ajan lyhenemisestä johtuva kauriiden leviäminen pohjoisemmaksi alueille, joilta löytyy niiden suosimaa peltojen ja metsien vaihtelun luonnehtimaa maisemarakennetta. Toisaalta metsäjänisten pitkäaikainen väheneminen vaikuttaa ilveksen ravinnonvalintaan, jolloin pieniin hirvieläimiin kohdistuu lisääntyvä saalistuspaine. Monin paikoin pienten hirvieläinten määrät ovat kääntyneet laskuun viime vuosina, ainakin osaksi lisääntyneen ilveskannan vuoksi.

Ilmaston muuttuessa keskeistä on hirvieläinkantojen pitäminen tasolla, jolla metsätuhot jäisivät siedettäväksi. Myös valkohäntä- ja metsäkauriin kannansäätelyn tehostaminen tulee entistä tärkeämmäksi, mikäli ne levittäytyvät nykyistä metsävaltaisemmille alueille. Myöskään metsien monipuolinen puulajirakenne ei saa vaarantua.

Kirjoittajat: *Heikki Henttonen, Otso Huitu ja Juho Matala*

- Hankkeen vetäjä: professori [Heikki Henttonen](#)
- Muut tutkijat: Otso Huitu, Sauli Härkönen, Juho Matala, Jukka Niemimaa ja Ari Nikula
- Hanke 3493: [Nisäkkäiden aiheuttamat metsätuhot muuttuvassa ilmastossa](#)
- [Artikkelin lähteet](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036209>

## Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

### Uusiutuvan energian tukipolitiikan kustannusvaikutukset ja tehokkuus: tukimuodolla tärkeä merkitys

Metsät ja niiden käyttö vaikuttavat maapallon hiilidioksiditaseeseen, ja niillä voi olla suuri merkitys ilmastonmuutoksessa ja sen hillinnässä. Paitsi metsien hiilinieluna, metsäsektori voi hillitä ilmastonmuutosta käyttämällä puutuotteita hiilinieluna. Lisäksi puulla voidaan korvata fossiilisia polttoaineita sekä materiaaleja, joiden valmistuksessa käytetään fossiilisia polttoaineita.

Uusiutuvan energian tukipolitiikat ovat tärkeitä, kun pyritään hillitsemään ilmastonmuutosta sekä vähentämään öljyriippuvuutta. Poliittisen päätöksenteon tueksi tarvitaan tietoa, miten kustannustehokkaita energia- ja ilmastopolitiikan ohjauskeinot ovat ja millaisia vaikutuksia niillä saavutetaan. Keskeisinä kysymyksiä tutkimuksessamme olivat puuperäisten biopolttoaineiden yhteispoltto fossiilisten polttoaineiden kanssa ja sen vaikutukset, pellettituotanto ja sen eri tukikeinojen mahdollisuudet sahateollisuuden yhteydessä sekä biojalostamatoiminnan mahdollisuudet massa- ja paperiteollisuuden yhteydessä.

Koska Suomen metsä- ja energiasektorin kytkökset voimistuvat tulevaisuudessa ja tarve niiden samanaikaiseen tarkasteluun kasvaa, olemme kehittäneet numeerisen politiikkamallin kuvaamaan metsä- ja energiasektoreita. Tätä instrumenttia voidaan jatkossa käyttää sekä tutkimuksen että poliittisen päätöksenteon tukena.

### Tukipolitiikalla voidaan lisätä uusiutuvan energian käyttöä yhteispoltossa

Fossiilisen polttoaineen ja biomassan yhteispoltto on yksi tehokkaimmista tavoista lisätä uusiutuvan energian käyttöä sähköntuotannossa. Yhteispoltton oletetaan kattavan globaalisti melkein puolet biomassalla tuotetun sähkön kasvusta vuoteen 2030 mennessä.

Hankkeen tulokset osoittavat, että syöttötariffi ja -premio sekä päästökauppa lisäävät uusiutuvan polttoaineen käyttöä yhteispoltossa. Eri ohjauskeinoilla voi kuitenkin olla päällekkäisvaikutuksia: Tutkimuksemme mukaan syöttöpremio lisää uusiutuvan energian tuotantoa yhtäläisellä voimakkuudella päästöoikeuden hinnasta riippumatta, mikä voi johtaa epäedullisen suureen uusiutuvan energian käyttöön. Syöttötariffin vaikutus heikkenee päästöoikeuden hinnan noustessa, mahdollisesti jopa vähentää uusiutuvan energian tuotantoa tehokkaissa hiililaitoksissa.

### Ohjauskeinoilla voidaan lisätä puun energiakäyttöä

Työ- ja elinkeinoministeriö (TEM 2010, pdf) on linjannut uusiutuvan energian velvoitepaketissa pelleteille kahden TWh:n ja biopolttonesteille seitsemän TWh:n kulutustavoitteen vuodelle 2020. Velvoitteiden toteutumiseksi tarvitaan investointeja ja tukia. Tutkimuksessamme tarkastelimme pelletti-investoinnin kannattavuutta teollisen sahan ja biopolttonesteinvestoinnin kannattavuutta sellu- ja paperitehtaan yhteyteen eri tukivaihtoehdoilla. Tutkimuksissa tarkastellut ohjauskeinot olivat tuotantotuki, metsähakkeen käyttötuki sekä investointituki.

Tuotantotuki osoittautui vertailtavista tukikeinoista kustannustehokkaimmaksi: sen avulla suorat tukikustannukset jäivät alhaisimmiksi. Metsähakkeen käyttötuki johti suurempiin kustannuksiin, mutta kohdensi tehokkaasti metsähakkeen uusiutuvan energian raaka-aineeksi. Metsähakkeen käytön lisääminen on yksi Suomen uusiutuvan



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

**Tuotantotuki** on julkisen vallan maksama lisähinta lopputuoteyksikköä kohden eli tuottaja saa tuotteistaan markkinahintaa korkeamman hinnan. Metsähakkeen käyttötuen

energian tavoitteiden kulmakivistä. Investointituen kustannustehokkuudesta saatiin vaihtelevia tuloksia.

Tuotantotuki ja investointituki eivät muuta raaka-aineiden suhteellisia hintoja energiantuotannossa. Tämän vuoksi vääristymät raaka-ainemarkkinoilla ovat vähäisiä ja siksi tukikeinot voivat olla kustannustehokkaita. Samalla luovutaan ohjauskeinon kyvystä ohjata tuottajien raaka-aine valintaa. Metsähakkeen käyttötuki on kalliimpi ohjauskeino, mutta sen avulla uusiutuvan energian tuotantoon voidaan ohjata metsähaketta, joka ei kilpaile teollisuuden puunkäytön kanssa.

tapauksessa metsähakkeen käyttäjä saa korvauksen käyttämiensä metsähakekuidioiden mukaan eli tuottajan kohtaama metsähakkeen hinta on markkinahintaa alhaisempi. **Investointituen** tapauksessa julkinen valta alentaa investointikustannuksia.

Investointituen havaittiin olevan ongelmallinen, kun tuotettu uusiutuva energia ei ole kilpailukykyinen korvaavan fossiilisen polttoaineen kanssa. Tällöin korkeakaan investointituki ei kannustanut investointeihin. Huonossa markkinatilanteessa tuettuakaan investointia ei aina hyödynnetä, vaan laitoksen käyttöaste voi jäädä alhaiseksi. Tämä saattaa merkittävästi heikentää investointituen tehokkuutta. Tuotantotuen ja metsähakkeen käyttötuen määrä sen sijaan riippuu tuotannon tasosta ja siksi ne kannustavat voimakkaammin käyttämään investoitua laitosta.

Kaikkien ohjauskeinojen avulla päästään puun energiakäytön lisäämiseen. Metsähakkeen käyttötuen tapauksessa uusien energiatuotteiden valmistamiseen käytettiin vain metsähaketta. Tuotantotuki ja investointituki kannustavat monipuolisempaan panosrakenteeseen: Pellettituotannossa pääpaino on sahan omilla sivutuotteilla. Biojalostamon raaka-aineina käytettiin pääasiallisesti metsähaketta ja kuorta, mutta myös pienempiä määriä kuitupuuta, purua ja sahaketta.

## Syöttötariffilla ja -premiolla voi olla myös ongelmallisia vaikutuksia

Tulokset osoittavat, että sekä syöttötariffilla että -premiolla saattaa olla ongelmallisia vaikutuksia, kun niitä käytetään politiikkainstrumentteina yhdessä päästökaupan kanssa. Näiden yhteisvaikutusten huomioiminen ilmasto- ja energiapolitiikkaa suunniteltaessa onkin ensiarvoisen tärkeää. Myös investointitukiin liittyvä kannustevaje tuotannon suhteen on tärkeä tiedostaa politiikan suunnittelussa.

Kirjoittajat: *Jussi Lintunen* ja *Jussi Uusivuori*

- Hankkeen vetäjä: professori [Jussi Uusivuori](#)
- Muut tutkijat: Maarit Kallio, Hanna-Liisa Kangas, Juhapekka Kyllönen, Jani Laturi, Jussi Lintunen, Kaija Lähtinen, Ilona Piironen, Johanna Pohjola, Tarmo Rätty, Antti Saastamoinen, Risto Seppälä, Risto Sievänen ja Anna Vanhatalo
- Hanke 3441: [Ilmastopolitiikka metsäsektorilla](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036210>

# Metsäekosysteemien toiminta ja metsien käyttö muuttuvassa ilmastossa (MIL) -tutkimusohjelman loppuraportti

MIL-kotisivu

Loppuraportti

Raportin sisältö

## Metsät ilmastonmuutoksen hillinnässä ja siihen sopeutumisessa

Ilmasto ja maaperätekijät asettavat reunaehdot metsien kasvulle, puuntuotantomahdollisuuksille ja hiilensitomiskyvylle, mutta viime kädessä metsien käsittelytapa ja käyttö määräävät metsien hiilinielujen suuruuden. Metsien käyttöön ja metsäsektoriin kohdistuu ilmastonmuutoksen ja ilmastopolitiikan ohella useita muutostekijöitä, joista vaikutuksiltaan ehkä merkittävin on uusiutuvan energian käytön lisäämisvelvoite.

Metsien hoitoon ja puubiomassaan pohjautuvien tuotteiden käyttöön vaikuttavilla ohjauskeinoilla voidaan parhaimmillaan vähentää kasvihuonekaasupäästöjä ja lisätä ekosysteemien kykyä sopeutua ilmastonmuutokseen. Toisaalta jotkut politiikkayhdistelmät voivat olla vaikutuksiltaan ristiriitaisia tai tehottomia.



Kuva: Metla/Erkki Oksanen

## Metsien ja metsäsektorin tulevaisuuden arviointiin tarvitaan malleja

Malleilla voidaan tarkastella muuttuvien olosuhteiden vaikutuksia metsiin ja metsäsektoriin. Mallien avulla on mahdollista ja hyödyllistä tarkastella muun muassa metsänkasvatusketjujen ja ilmasto- ja energiapolitiittisten ohjauskeinojen toimivuutta ja kustannustehokkuutta sekä ennakoida puumarkkinoiden ja metsäteollisuuden toimintaedellytyksiä tulevaisuudessa. Olemme käyttäneet ja edelleenkehittäneet muun muassa maaperän hiilivarastojen muutosta sekä maan vesitaloutta kuvaavia malleja, metsähakkeen tarjontaa ja kysyntää energiapuuna Suomessa kuntatasolla kuvaavaa markkinamallia (ForENER) ja Euroopan metsäsektoria kuvaavaa dynaamista markkinatasapainomallia (EUFASOM). Olemme käyttäneet myös globaalia metsäsektorimallia (EFI-GTM) metsäsektorin ja energiapuun tarjonnan tarkasteluun eri IPCC-skenaarioissa sekä Euroopan puurakentamisen lisäämisestä aiheutuvien vaikutusten arvioinnissa. Yhdessä yhteistyökumppaniemme kanssa olemme soveltaneet malleja myös trooppisten metsien hiilivarastojen muutosten arviointiin. Tältä osin menetelmämme parantavat kehitysmaiden mahdollisuuksia seurata maaperän hiilivaraston muutoksia, mikä on edellytyksenä kansainvälisesti sovitun REDD+ rahoituksen saamiselle metsien häviämistä torjuviin toimiin.

## Taloudellisesti optimaalinen metsänkasvatusketju voi olla epäedullinen hiilensidonnan näkökulmasta

Arvioimme mallien avulla, miten erilaiset metsänkäsittelyvaihtoehdot poikkeavat toisistaan puuntuotannon tai puuston ja maaperän hiilitaseen kannalta muuttuvissa ilmasto-oloissa. Ilmastonmuutos lisäsi kuusen kasvua hakkuiden ajoituksesta riippumatta. Sekä kasvillisuuden että maaperän hiilivarasto oli muuttuvassa ilmastossa suurempi kuin nykyilmastossa. Vaikka ilmastonmuutoksen seurauksena kohoava lämpötila ja sadanta kiihdyttävät maaperän orgaanisen aineksen hajoamista, biomassatuotanto ja karikesyöte kasvavat voimakkaammin ja maaperään sitoutuu muuttuvassa ilmastossa nykyistä enemmän hiiltä.

Taloustmetsien käsittelyvalinnoilla voidaan vaikuttaa hiilitaseeseen ja hillitä ilmastonmuutosta. Tutkimustulokset osoittavat, että metsien käsittely vaikuttaa metsien hiilitaseeseen voimakkaammin kuin ilmastonmuutos. Muuttuvassa ilmastossa kuusen taloudellisesti optimaalinen kiertoaika lyhenee. Käsittelyketju, jossa tavoiteltiin mahdollisimman suurta taloudellista kannattavuutta voimakkaiden ja tavanomaista aikaisemmin tehtyjen hakkuiden avulla, johti puuston hiilivaraston pienentymiseen. Sen seurauksena väheni myös karikesyöte maaperään ja maaperä ei enää ollut hiilinielu kuten nykysuositusten mukaisesti käsitellyissä tai harventamattomina kehityvissä metsissä. Tutkimuksemme mukaan käsittelemättömän metsän hiilivarasto on suurempi kuin käsitellyn taloustmetsän.

## Puurakentamisen lisäämisellä voidaan hillitä ilmastonmuutosta

Rakennuspuutuotteet varastoivat puuhun sitoutunutta hiiltä ja korvaavat materiaaleja, joiden valmistaminen ja käyttö aiheuttaisivat suuremmat kasvihuonekaasupäästöt kuin puu. Elinkaaren loppuvaiheessa puutuotteet voidaan hyödyntää energiana. Jopa puolet rakennusmateriaalina käytetyn puun laskennallisista ilmastohyödyistä perustuu siihen, että puurakennuksesta saatavilla purkujätteillä korvataan fossiilisia polttoaineita. Rakentamis- ja purkujätteiden hyödyntämiseen tulisivat kiinnittää erityistä huomiota.

Jos puurakentaminen vähitellen yleistyisi kerrostalorakentamisessa niin, että Euroopassa rakennettaisiin vuosittain miljoona puurakenteista kerrostalohuoneistoa, sahatavaran ja tukkipuun kysyntä kasvaisivat laskelmiemme mukaan varsin maltillisesti. Sahateollisuuden kannattavuus paranisi, vaikka tukkipuun hinta hieman nousisi ja sivutuotteena saatavan hakkeen hinta hieman laskisi. Puutavaralajien hintasuhteet eivät muuttuisi niin merkittävästi, että sillä olisi vaikutusta boreaalisten metsien optimaaliseen käsittelyyn. Toisaalta myös vaikutukset hiilen sidontaan olisivat verrattain pienet sekä metsissä että rakennuspuutuotteissa niiden elinkaaren aikana. Euroopan kasvihuonekaasupäästöissä säästettäisiin vuosittain alle 0,5 % vuoden 1990 tasosta. Tämän lisäksi on kuitenkin huomioitava rakennuskantaan varastoituneen hiilen määrän kasvu.

Tarkastelemassamme ääritapauksessa, jossa sahatavaran kulutus asukasta kohti nousisi muuallakin Euroopassa Suomen tasolle noin yhteen kuutiometriin vuodessa, tukkipuun ja sahatavaran tuonti Eurooppaan kasvaisi niin suuresti, että systeemin ekologista kestävyyttä voidaan epäillä.

## Metsäenergian käyttötavoitteet ovat haastavia ja niiden ilmastohyödyistä ei ole täyttä varmuutta

Euroopan unioni velvoittaa Suomea nostamaan uusiutuvilla energiamuodoilla tuotetun energian osuuden 38 prosenttiin energian loppukäytöstä vuoteen 2020 mennessä. Liikennepolttoaineissa biopolttoaineiden tavoiteosuus on 20 prosenttia. Puun energiakäytön lisääminen on välttämätöntä tavoitteiden saavuttamiselle. Metsähakkeen (latvusmassa, kannot ja pienpuu) käyttötavoite sähkön ja lämmön tuotannossa on noin 13,5 miljoonaa kiintokuutiometriä. Tavoite pääasiassa metsähakkeella tuotetuille liikennepolttoaineille on seitsemän terawattituntia, joka vaatisi vähintään viisi miljoonaa kuutiometriä puuta.

Mallilaskelmiemme mukaan metsähakkeen käyttötavoitteet eivät ole saavutettavissa ilman metsäteollisuuden kotimaisen puun käytön ja sen myötä raakapuun hakkuiden merkittävää kasvua. Latvusmassan ja kantojen tarjonta on sidoksissa päätehakkuiden volyyymiin, joka määräytyy ennen kaikkea sahateollisuuden ja muun tukkipuuta käyttävän teollisuuden tuotannosta.

Saha- ja vaneriteollisuuden tuotanto on ollut voimakkaassa laskussa heikon kannattavuuden takia. Alan kannattavuutta parantavat toimet, kuten puurakentamisen, sahojen energiainvestointien ja tukkipuun tarjonnan edistäminen, parantaisivat myös metsähakkeen saatavuutta. Toisaalta Suomen kasvavat puuvarannot mahdollistavat sen, että myös kuitupuuta voidaan käyttää energiaksi.

Uusiutuvalla puuenergialla tuotettu sähkö ja lämpö luokitellaan kasvihuonekaasujen päästökaupassa päästöttömäksi. Nykyistä selvästi korkeammat kasvihuonekaasujen päästöluvan hinnat johtaisivat jo sinällään lisääntyvään metsähakkeen käyttöön. Päästökaupasektorilla toimivien yritysten on kuitenkin vaikeaa ennakoida päästölupien tulevaa hintakehitystä, ja päästöluvan hintaan sidottu sähkön tuotantotuki vähentää toimijoiden epävarmuutta polttoainevalinnassa. Myös ensiharvennuspuille myönnetty tuki kannattaisi sitoa päästöluvan hintaan.

Biopolttoaineita tekevät biojalostamot kilpailevat puupolttoaineista sähkö- ja lämpölaitosten kanssa. Tutkimuksemme mukaan biojalostamoiden markkinoille tulo nostaisi metsähakkeen hintoja merkittävästi, vähentäisi päästökaupasektorin metsähakkeen käyttöä, ja heikentäisi olennaisesti puuenergian lisäämiseen suunnattujen tukien kustannustehokkuutta.

Suomen metsät tulevat olemaan merkittävä ja kasvava hiilinielu siinäkin tapauksessa, että vuodelle 2020 asetettuihin energiatarvoitteisiin päästään. Alustavien mallilaskelmien perusteella näyttää kuitenkin siltä, että Suomen puuenergiatarvoitteita ei voida perustella niiden ilmastohyödyillä. Kun korvataan kivihiihiltä ja turvetta puubiomassalla tavoitteen mukaisesti, metsien hiilinielu pienenee enemmän kuin kivihiihen ja turpeen polton hiilipäästöt vähenevät. Siten puuenergiatarvoitteen toteutuessa ilmakehässä olevan hiilen määrä lisääntyisi verrattuna siihen, ettei puuenergiaa suositaisi. Laskelmissa ei tosin huomioitu riskiä: metsien hiilinieluja painottava ilmastopolitiikka olisi altis ilmastonmuutoksen mukana lisääntyville myrsky- ja hyönteistuhouille ja metsäpaloille. Myös boreaalisten metsien säteilynheijastuskyvyn eli albedon vaikutusten tutkimus on vielä melko aluillaan ja se saattaa tulevaisuudessa muuttaa käsityksiä metsien hakkuiden kokonaisvaikutuksista ilmaston lämpenemiseen.

Tarkasteltaessa puupohjaisen energian näkymiä koko Euroopassa voidaan todeta, että puubiomassalla on väistämättä melko vähäinen rooli Euroopan Unionin uusiutuvien energiamuotojen käyttötavoitteiden saavuttamisen kokonaisuudessa, vaikkakin metsäteollisuudelle ja Suomelle kysymys on tärkeä. Mikäli kasvihuonekaasujen päästölupien hinta nousisi huomattavasti, esimerkiksi 50 euroon hiilidioksiditonnilta,

energiasektori alkaisi yhä enenevässä määrin käyttää puuta, joka soveltuisi myös sellu- ja levyteollisuuden käyttöön. EU:n jäsenmaissa on päästökaupan rinnalla käytössä muitakin puuenergian käyttöä suosivia tukia ja veroja, joten käytännössä energiasektori alkaa kilpailla metsäteollisuuden kanssa kuitupuusta ja hakkeesta jo tätä alemmillakin päästölupien hinnoilla. Jatkolaskelmissa tullaan arvoimaan metsäenergian lisääntyvän käytön vaikutus Euroopan metsien hiilinieluihin.

Ilmastonmuutoksen torjunta ei ole ainoa peruste tavoitteelle muuttaa energiajärjestelmien painotusta fossiilista polttoaineista uusiutuviin energimuotoihin. Ilmasto-, energia- ja teknologiapoliittisten ohjauskeinojen suunnittelussa on kuitenkin syytä huomioida, että puuenergialla saavutettavat kasvihuonekaasupäästöjen vähennykset saattavat olla melko vaatimattomia lyhyellä mutta ilmastonmuutoksen hillitsemisen kannalta oleellisella aikavälillä ja että puuenergian lisääntyvä käyttö voi heikentää ilman yhteiskunnan tukia toimivan puun materiaalikäytön kannattavuutta.

Kirjoittajat: *Maarit Kallio* ja *Raisa Mäkipää*

- Hankkeen vetäjä: vanhempi tutkija [Maarit Kallio](#)
- Muut tutkijat: [Mäkipää Raisa](#)
- Hanke 3527: [Euroopan metsät ilmastonmuutoksen hillinnässä ja siihen sopeutumisessa](#)
- [Hankkeen julkaisut](#)

[Takaisin raportin sisältöön](#)

[Sivun alkuun](#)

Tämän artikkelin pysyvä osoite on  
<http://urn.fi/URN:NBN:fi:metla-201210036211>