

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.

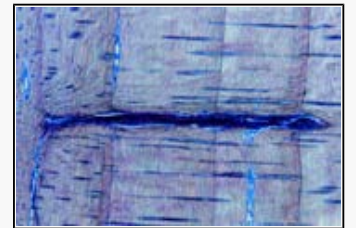
Menetelmäkehittely takaa laadukkaampaa tietoa ilmastohistoriasta

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 kesäkokesän lämpötila ovat selvästi keskimääräistä parempia. Tästä voidaan päätellä, että pituuskasvu on paksuuskasvua herkempi kesäkokesän lämpötiloille.

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 instrumentaaliajan taakse ulottuvia aikasarjoja, jotka perustuvat esimerkiksi puiden vuosikasvuihin tai historiallisiin dokumentteihin kuten järvien ja jokien jäänlähöajankohtiin. Rakensimme Suomen ympäristökeskuksen ylläpitämän Tornionjoen jäänlähöasarjan avulla huhti–toukokuun lämpötilan vuosille 1693–2011.

Jäänlähösarjasta saatu lämpötila selittää 67 % mitatun 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>