

Boreaalisen vyöhykkeen puiden talvehtiminen lämpenevässä ilmastossa

Heikki Hänninen

Johdanto

Boreaalisen vyöhykkeen kasvit kasvavat ilmastossa, jota luonnehtii ilman lämpötilan suuri vuodenaikaisvaihtelu. Äärimmäisessä tapauksessa Siperiassa lämpötila voi olla yli +30 °C kesällä ja alle -70 °C talvella, joten ilman lämpötilan vaihtelu vuodenaikojen välillä voi olla jopa yli sata astetta. Pintakasvillisuus talvehtii suojaavan lumipeitteen alla, joten se ei altistu talven äärimmäisen koville pakkasille. Toisin on laita metsäpuiden kohdalla, joiden maan yläpuoliset kasvusolukot altistuvat talvehtiessään kaikille sään vaihteluille. Puiden poikkeuksellisen suuri sopeutumiskyky perustuu niiden vuosittaiseen kehityssykliin ja sen tapahtumien synkronoimiseen ilmastollisen vuosisyklin kanssa. Puut ovat kesällä aktiivissa kasvutilassa, johon väistämättä liittyy hyvin vähäinen pakkaskestävyys. Talvella puut kestävät erittäin kovia pakkasia, kokeellisesti on havaittu monien havupuulajien kestävän talvella jopa nestemäisen typen lämpötilaa (-196 °C). Tällaiseen kestävyteen liittyy oleellisesti syvä talvihorros, jonka vallitessa puissa ei tapahtu kasvuprosesseja vaikka lämpötila nousisikin lyhyeksi ajaksi kasvulle suotuisiin lukemiin.

Vuoden keskilämpötilan ennustetaan nousevan boreaalisisä vyöhykkeessä lähivuosisikymmenien aikana useilla asteilla, ja lämpenemisen ennustetaan olevan talvella voimakkaampaa kuin kesällä. Näiden ennusteiden toteutuminen merkitsee puiden talviaikaisen pakkasstressin vähenemistä,

jolloin ilmaston lämpeneminen saattaisi tätäkin kautta edesauttaa boreaalisen vyöhykkeen puiden kasvua. Tätä taustaa vasten tuntuu yllättävältä, että ilmaston lämpenemisen on ennustettu myös lisäävän puiden pakkasvaurioita, ja äärimmäisessä tapauksessa jopa estävän nykyisten puulajien esiintymisen boreaalisisä vyöhykkeessä. Tässä kirjoituksessa tarkastellaan tätä 1980-luvun puolivälissä esitettyä hypoteesiä lähemmin. Kuinka tutkijat päätyivät aikoinaan hypoteesiin, kuinka hypoteesiä on testattu ja miltä boreaalisten puiden tulevaisuus näyttää viimeisimmän hypoteesiä koskevan tutkimuksen valossa?

Puiden vuosirytmien säätöminen

Vakiintuneen käsityksen mukaan ilman lämpötila ja päivänpituus ovat tärkeimmät puiden vuosisyklin tapahtumien ajoittumista (eli puiden vuosirytmia) säätelevät tekijät. Tarkkaan ottaen päivänpituuden sijasta fysiologisesti vaikuttava tekijä on yön pituus, eli vuorokauden yhtäjaksoisen pimeän jakson pituus. Tähän käsitykseen on päädytty kokeissa, joissa pimeä jakso on keskeytetty lyhytaikaisella, joitakin minutteja kestäväällä valokäsittelyllä. Jos esimerkiksi puut altistetaan vuorokauden aikana 12 tunnin ajaksi valolle ja 12 tunnin ajaksi pimeälle siten, että pimeän jakson puolivälissä valot ovat päällä joidenkin minuuttien ajan, niin puut aistivat tällaisen käsittelyn 18 tunnin päiväksi ja 6 tunnin yöksi. Tässä kirjoitukses-

sa puhutaan täsmällisyyden vuoksi yönpituuden vaikutuksesta, vaikka näitä ilmiöitä käsiteltäessä kirjallisuudessa käytetään varsin usein tutumpaa käsitettä päivänpituus.

Yönpituuden kasvu loppukesällä on keskeinen puiden kasvun päättymiseen ja talveentumisen alkamiseen vaikuttava tekijä. Puhutaan ns. kriittisestä yönpituudesta, jonka saavuttaminen aiheuttaa näiden kehitystapahtumien alkamisen. Kriittinen yönpituus on saman lajin pohjoisilla alkupeurilla lyhyempi kuin eteläisillä alkuperillä. Tämä on varsin ymmärrettävää kun muistetaan, että ennen syyspäivän tasausta yö on tietyllä päivämäärällä pohjoisessa lyhyempi kuin etelässä. Vaikka talveentuminen siis alkaisi samana päivänä pohjoisessa ja etelässä, niin se alkaisi pohjoisessa lyhyemmällä yönpituudella kuin etelässä. Aikaisempi talventulo pohjoisessa lisää luonnollisesti eri puualkuperien välisten kriittisten yönpituuksien eroja vielä tätä, puhtaasti maantieteellisistä syistä aiheutuvaa eroa suuremmaksi.

Yönpituus ei ole ainoa kasvun päättymiseen ja talveentumisen alkamiseen vaikuttava tekijä. Viimeksi kuluneen parinkymmenen vuoden aikana erityisesti suomalaisissa tutkimuksissa on havaittu, että myös kasvukauden lämpöoloilla on merkitystä kasvun päättymiseen. Korkeat lämpötilat nopeuttavat kasvun päättymistä. Kriittinen yönpituus ei siis ole tämän mukaan vakio, vaan se on sitä pienempi mitä lämpimämpi edeltävä kasvukausi oli. Myös kuivuus ja ravinteiden saatavuus kasvupaikalla voivat vaikuttaa kasvun päättymiseen ja talveentumisen alkamiseen.

Kasvun päättymisen jälkeen matalat lämpötilat aiheuttavat puiden karaistumista, eli niiden pakkaskestävyyden lisääntymistä. "Matalat lämpötilat" tarkoittaa tässä sekä viileitä, lähellä +5 °C olevia lämpötiloja että myös nollan alapuolisia pakkaslämpötiloja. Toisaalta altistuminen viileille lämpötiloille aiheuttaa tässä vaiheessa puiden silmujen kasvukyvyn palautumisen, eli silmulevon purkautumisen. Kasvun päättymisen jälkeen silmut ovat fysiologisessa lepotilassa, jolloin niissä ei havaita kasvua, vaikka ulkoiset olosuhteet (erityisesti ilman lämpötila) olisivatkin kasvulle suotuisia. Joidenkin viikkojen mittainen altistuminen

viileille lämpötiloille poistaa silmujen lepotilan, jolloin ne ovat valmiita lähtemään kasvuun ilman lämpötilan kohotessa uudelleen. Tähän ilmiöön viitataan käsitteellä *silmulevon purkautumisen kylmävaatimus*. Ilmiön fysiologista perustaa ei tunneta tarkkaan, mutta sen merkitys puiden sopeutumisen kannalta on ilmeinen. Silmulevon purkautumisen kylmävaatimus varmistaa puiden säilymisen lepotilassa syksyllä niin pitkään, että kasvuunlähtöä mahdollisesti aiheuttavia korkeita lämpötiloja ei enää esiinny ennen seuraavaa kevättä. Kasvuunlähtö syksyllä olisi puiden kannalta tuhoisaa, koska sen seurauksena puut olisivat pakkaselle alttiissa kasvutilassa talven tullessa. Taimikokeiden mukaan silmulepo purkautuu myöhään syksyllä, yleensä loka-marraskuussa.

Silmulevon purkautumisen jälkeen riittävän pitkän altistus korkeille lämpötiloille saa aikaan puiden suveentumisen, eli pakkaskestävyyden vähenemisen, ja lopulta myös kasvuunlähdön. Vaadittava aika on sitä lyhyempi mitä korkeammalle lämpötila nousee. Tähän ilmiöön viitataan käsitteellä *kasvun alun lämpövaatimus*. Ilmiö lienee varsin tuttu muillekin kuin tutkijoille, siinä määrin ilmeinen lämpötilan nousun ja puiden ja muidenkin kasvien kasvuunlähdön yhteys keväällä on.

Pakkasvauriohypoteesin johtaminen

Edelläkuvatun puiden vuosirytmien säätymistä koskevan teorian pohjalta on laadittu matemaattisia simulointimalleja, joiden avulla voidaan ennustaa puiden sopeutumista erilaisiin ilmastoihin. Tutkittaessa tällä tavoin teoreettisesti puiden sopeutumista lämpeneviin talviin saatiin yllättävä tulos: simulointien mukaan talvien lämpeneminen lisää boreaalisisessa vyöhykkeessä merkittävästi puiden pakkasvaurioriskiä. Äärimmäisten tulosten mukaan näytti jopa siltä, että nykyiset puulajimme joutuvat väistymään kokonaan ilmaston lämmitessä.

Lämpenevässä ilmastossa puiden silmulevon purkautumisen kylmävaatimus täyttyy simulointien mukaan joitakin viikkoja myöhemmin kuin

nykyisessä ilmastossa. Tämä vuosisyklin etene-
misen hidastuminen kumoutuu kuitenkin silmul-
levon purkautumisen jälkeen tapahtuvan nopeu-
tuneen kehityksen vuoksi. Simulointien mukaan
puiden kevätkehitys käynnistyy lämpiminä talvi-
na silmulevon purkautumisen jälkeen esiintyvien
pitkien lauhojen jaksojen aikana, jolloin lämpötila
saattaa nousta päivittäin jopa kymmeneen asteeseen.
Puiden pakkaskestävyys purkautuu asteet-
tain näiden lauhojen jaksojen aikana, ja mikäli
lauha jakso on tarpeeksi pitkä ja lämmin, kasvu
käynnistyy kasvun alun lämpövaatimuksen täy-
tyttyä. Tällainen keskellä talvea tai hyvin aikaisin
kevällä tapahtuva kasvuunlähtö on puiden kan-
nalta vahingollista, ellei suorastaan tuhoisaa, koska
lauhojen jaksojen jälkeen esiintyy hyvin usein
kovia pakkasia. Tilannetta kuvaa joululaulusta
tuttu säe *“no onkos tullut kesä nyt talven keskel-
le”*. Tällainen ilmaston vuosisyklin muuttuminen
on monien simulointitutkimusten mukaan erittäin
vahingollista boreaalisen vyöhykkeen puille.

Pakkasvauriohypoteesin testaaminen

Pakkasvauriohypoteesin johtamisessa käytetyt
mallit perustuvat vuosikymmenien mittaan tehtyi-
hin laajoihin kokeellisiin tutkimuksiin. Suomessa
tämän tutkimustradition aloitti Metsäntutkimus-
laitoksella työskennellyt professori Risto Sarvas
1960-luvulla. Mallit saivat lisäksi vahvistusta tut-
kimuksissa, joissa niitä testattiin riippumattomilla,
luonnonolosuhteissa kerätyillä aineistoilla. Tässä
vaiheessa näytti siis siltä, että nämä pahoja
pakkasvaurioita ennustavat mallit kuvaavat koh-
tuullisen hyvin puiden vuosirytmien säätymistä.
Nämä huolestuttavat tutkimustulokset vaikuttivat
osaltaan siihen, että Joensuun yliopiston Mekri-
järven tutkimusasemalle perustettiin 1990-luvun
alussa laajamittainen kenttäkoe, jossa mäntyjä
kasvatetaan luontaisella kasvupaikallaan kohote-
tussa lämpötilassa (katso luku 7). Tutkittaessa
mäntyjen pakkaskestävyyden kehitystä ja kas-
vuunlähtöä kohotetussa lämpötilassa havaittiin,
että aikaisemmat simulointitutkimukset olivat mitä

ilmeisemmin yliarvioineet puiden pakkasvaurio-
riskin kasvun lämpenevässä ilmastossa. Kohote-
tussa lämpötilassa kasvavat männyt talveutuivat
kyllä myöhemmin ja suveutuivat aikaisemmin
kuin luontaisessa lämpötilassa kasvavat kontrol-
limännyt, mutta ero oli paljon pienempi kuin mitä
aikaisemmissa simulointitutkimuksissa oli ennus-
tettu. Kohotetussa lämpötilassa kasvavat puut läh-
tivät kasvuun tyypillisesti huhtikuussa noin kuu-
kautta kontrollipuita aikaisemmin, eivät siis kes-
kellä talvea, kuten simulointitutkimuksissa ennus-
tettiin. Keskellä talvea puiden pakkaskestävyydes-
sä ei ollut eroja eri koeryhmien välillä.

Pakkasvauriohypoteesiä testattiin myös puiden
alkuperäsiirtojen avulla. Näissä tutkimuksissa
havaittiin, että Pohjois-Suomalaiset puualkuperät
menestyvät hyvin Etelä-Suomalaisilla kasvupaik-
koilla. Siirrossa toteutui yhtä suuri tai suurempi
ilmaston lämpeneminen kuin mitä ennustetaan
tapahtuvan lähivuosikymmenien aikana puiden
luontaisilla kasvupaikoilla Pohjois-Suomessa.
Myös tämän havainnon katsottiin osaltaan kumo-
avan pakkasvauriohypoteesiä, vaikka toisaalta
huomautettiin, että talvet eivät lämmenneet siir-
rossa sillä tavoin kuin ennustetaan tapahtuvan il-
mastomuutoksen seurauksena Pohjois-Suomessa.

Vaara ei ole ohi

Viimeaikaisissa tutkimuksissa saadut hyvät uutiset
eivät merkitse sitä, että hypoteesi puiden kas-
vaneesta pakkasvaurioriskistä voidaan hylätä lo-
pullisesti. Hypoteesin virheellisyyteen viittaava
havaintoaineisto on varsin pieni, minkä lisäksi
viimeisimmät simuloititutkimukset osoittavat, että
suhteellisen pienet erot puiden vuosirytmien ym-
päristövasteessa aiheuttavat varsin suuren eron
simulointitutkimuksessa saatavaan ennusteeseen.
Puiden tulevaisuudesta on mahdotonta sanoa mitään
varmaa, mutta tällä hetkellä käytettävissä ole-
va tieto viittaa siihen, että pakkasvauriot tulevat
kyllä lisääntymään jossain määrin, mutta hurjim-
pien ennusteiden mukaisia laajamittaisia pakkas-
vaurioista aiheutuvia massatuhoja tuskin tullaan
näkemään, vaikka ilmasto lämpenisi merkittävä-

tikin. Pienetkin vauriot voivat kuitenkin altistaa puut erilaisille seuraustuholle, minkä vuoksi ne saattavat vaikuttaa olennaisesti puulajien väliseen kilpailuun ja eri puulajien menestymiseen. Pakkasvaurioille alttiimpia näyttävät olevan sellaiset puulajit, jotka aloittavat nykyisessäkin ilmastossa kasvunsa muita lajeja aikaisemmin. Näyttää myös siltä, että monilla lajeilla kukkiminen ja siementuotanto ovat suuremmissa vaarassa kuin puun kasvu ja hengissäsäilyminen.

Tähän mennessä kertyneet tutkimustulokset korostavat ennen muuta jatkotutkimusten tärkeyttä. Nykyisiin malleihin on kerätty suuri määrä puiden vuosirytmistä koskevaa tietoa, mutta kohotetussa lämpötilassa tehdyt kokeet osoittavat, että jotain ilmastomuutosten seurausten kannalta keskeistä malleista edelleen puuttuu. Lisätutkimuksia kaivataan erityisesti silmulevon purkautumisesta. Edelläkuvattu teoria, jonka mukaan silmulepo purkautuu myöhään syksyllä viileiden lämpötilojen vaikutuksesta, on testattu moneen otteeseen eri puulajien taimilla. Viimeaikaiset aikuisilla puilla tehtyt tutkimukset viittaavat kuitenkin siihen, että aikuisten puiden silmulepo purkautuu huomattavasti myöhemmin keväällä. Jatkotutkimuksissa on selvitettävä, pitääkö tämä hypoteesi paikkansa ja mitä muita tekijöitä viileäaltistuksen lisäksi mahdollisesti aikuisten puiden silmulevon purkautumiseen tarvitaan. Tässä riittää työsarkaa pitkäksi ajaksi, koska aikuisilla puilla tehtävä tutkimus on tunnetusti menetelmällisesti hyvin vaikeaa.

Entä muut metsäkasvit?

Tutkimuksessa ja myös käytännön metsänhoidossa on kiinnitetty parin viimeksi kuluneen vuosikymmenen aikana kasvavaa huomiota luonnon monimuotoisuuden säilyttämiseen. Toisaalta, kuten Kuopiossa syksyllä 2004 pidetty seminaarikin osaltaan osoittaa, ilmastomuutoksen vaikutuksia metsäpuihin ja metsäekosysteemin toimintaan on tutkittu varsin laajalti. On yllättävää huomata, että monimuotoisuustutkimus yhtäältä ja ilmastomuutostutkimus toisaalta eivät ole juuri kohdanneet

toisiaan. Eri kasvilajien esiintymisen ilmastovaihtimuksia kuvaavien mallien avulla on ennustettu, että Pohjois-Euroopassa noin puolet nykyisestä kasvilajistosta korvautuu uusilla lajeilla ilmaston lämmetessä lähimmän viidenkymmenen vuoden kuluessa. Käykö ilmaston lämmetessä todella näin, vai onko näissä tutkimuksissa käytetyissä malleissa samankaltaisia piileviä puutteita kuin mitä paljastui metsäpuiden talvehtimistä kuvaavista malleista testattaessa niitä kokeellisesti? Tätä ei voida tietää, ellei mainittuja kasvistomalleja testata laajamittaisen koetoinnin avulla. Tällainen koetointi on toistaiseksi niin vähäistä, että voisi luulla metsissämme viidenkymmenen vuoden päästä havaittavan monimuotoisuuden olevan tämän päivän ihmisille yhdentekevää. Tässäkin asiassa tarvittaisiin sitä kymmenien vuosien mittaista aikahorisonttia, jota käytännön metsäammattilaiset ovat metsiemme puuvaroja hoitaessaan perinteisesti soveltaneet.

Kirjallisuus

- Häkkinen, R. 1999. Analysis of bud-development theories based on long-term phenological and air temperature time series: application to *Betula* sp. leaves. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 754. 59 s.
- Hänninen, H. 1990. Modelling bud dormancy release in trees from cool and temperate regions. Acta Forestalia Fennica 213. 47 s.
- Hänninen, H. 1991. Does climatic warming increase the risk of frost damage in northern trees? Plant, Cell and Environment 14: 449-454.
- Hänninen, H. 1995. Effects of climatic change on trees from cool and temperate regions: an ecophysiological approach to modelling of bud burst phenology. Canadian Journal of Botany 73: 183-199.
- Hänninen, H. 1996. Effects of climatic warming on northern trees: testing the frost damage hypothesis with meteorological data from provenance transfer experiments. Scandinavian Journal of Forest Research 11: 17-25.
- Hänninen, H., Leinonen, I., Repo, T. & Kellomäki, S. 1996. Overwintering and productivity of Scots pine in a changing climate. Silva Fennica 30: 229-237.

- Hänninen, H., Beuker, E., Johnsen, Ø., Leinonen, I., Murray, M., Sheppard, L. & Skrøppa, T. 2001. Impacts of climate change on cold hardiness of conifers. Julkaisussa: Bigras, F.J. & Colombo, S.J. (toim.), *Conifer Cold Hardiness*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht. s. 305-333.
- Kellomäki, S., Hänninen, H. & Kolström M. 1995. Computations on frost damage to Scots pine under climatic warming in boreal conditions. *Ecological Applications* 5: 42-52.
- Koski, V. & Sievänen, R. 1985. Timing of growth cessation in relation to the variations in the growing season. Julkaisussa: Tigerstedt, P.M.A., Puttonen, P. & Koski, V. (toim.), *Crop physiology of forest trees*. Helsinki University Press, Helsinki. s. 167-193.
- Leinonen, I. 1996. A simulation model for the annual frost hardiness and freeze damage of Scots pine. *Annals of Botany* 78: 687-693.
- Leinonen, I. 1997. Frost hardiness and annual development of forest trees under changing climate. D.Sc. (Agr. and For.) thesis. Joensuun yliopiston Metsätieteellisen tiedekunnan julkaisuja 60. 42 s.
- Linkosalo, T. 2000. Analyses of the spring phenology of boreal trees and its response to climate change. Helsingin yliopiston Metsäekologian tiedekunnan julkaisuja 22. 55 s.
- Partanen, J. 2004. Regulation of growth onset and cessation in Norway spruce, Scots pine and silver birch. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 921. 39 s.
- Repo, T. 1993. Impedance spectroscopy and temperature acclimation of forest trees. Joensuun yliopiston Metsätieteellisen tiedekunnan julkaisuja 9. 53 s.
- Repo, T., Hänninen, H. & Kellomäki, S. 1996. The effects of long-term elevation of air temperature and CO₂ on the frost hardiness of Scots pine. *Plant, Cell and Environment* 19: 209-216.
- Sarvas, R. 1972. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. Active period. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 76(3): 1-110.
- Sarvas, R. 1974. Investigations on the annual cycle of development of forest trees. II. Autumn dormancy and winter dormancy. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 84(1): 1-101.