

METSIIEN ELINVOIMAISUUS

Metsäntutkimuspäivä Vantaalla 1993

Eino Mälkönen ja Sari Elomaa
(toim.)

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 492

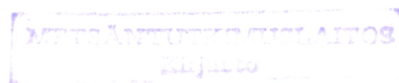
METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Kirjasto

METSIEN ELINVOIMAISUUS
Metsäntutkimuspäivä Vantaalla 1993

Eino Mälkönen ja Sari Elomaa
(toim.)

Metsäntutkimuslaitos
Metsäekologian tutkimusosasto
Vantaa 1994

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 492



Mälkönen, Eino & Elomaa, Sari. 1994. Metsien elinvoimaisuus. Metsäntutkimuspäivä Vantaalla 1993. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 492. 63 s. ISBN 951-40-1356-5, ISSN 0358-4283

Metsäekologian tutkimusosaston vuotuinen tutkimuspäivä, jonka aiheena oli "Metsien elinvoimaisuus", järjestettiin Tiedekeskus Heureka tiloissa Vantaalla 8.12.1993. Tutkimuspäivän esitelmissä esiteltiin Metsäntutkimuslaitoksen perustamaa Metsien terveydentilan tutkimusohjelmaa ja sen hankkeissa saatuja uusimpia tuloksia. Esitelmät on koottu tähän julkaisuun.

Kiitän järjestäjien puolesta tutkimuspäivää kohtaan osoitetusta mielenkiinnosta ja toivon, että tämä julkaisu olisi hyödyllinen niin tilaisuuteen osallistuneille kuin muillekin metsien terveydentilasta kiinnostuneille.

Eino Mälkönen

Avainsanat: Ilman epäpuhtaudet, harsuuntuminen, happamoituminen, ravinnekierto, soluvauriot, tuhonkestävyys, metsätuhot

Toimittajien yhteystiedot: Eino Mälkönen ja Sari Elomaa, Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto, PL 18, 01301 Vantaa (puh. 90-857 051)

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos, Hanke 3119.

Hyväksynyt: Tutkimusjohtaja Eero Paavilainen 14.4.1994.

Jakaja: Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto, PL 18, 01301 Vantaa

Sisällys

Eino Mälkönen: Metsien terveydentilan tutkimusohjelma	5
Martti Lindgren ja Maija Salemaa: Metsiemme elinvoima. Tilanearviointi vuosilta 1986-1993	11
Hannu Yli-Kojola: Tuhojen esiintyminen Etelä-Suomen metsissä VMI:n tulosten mukaan	17
Pekka Tamminen: Metsämaiden viljavuus ja happamoituminen	23
Hannu Raitio: Kangasmetsien ravinnetila neulasanalyysien valossa vuosina 1987-1989	31
Heljä-Sisko Helmisaari: Metsikön ravinnekierto ympäristömuutosten osoittajana	40
Maarit Kytö, Pekka Niemelä ja Erkki Annila: Metsäpuiden tuholaisresistenssi.....	49
Sirkka Sutinen: Soluvaurioiden diagnostiikka	54

Metsien terveydentilan tutkimusohjelma

Eino Mälkönen
Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto
PL 18, 01301 Vantaa

Taustaa

Suomen metsävarat ovat karttuneet parin viimeisen vuosikymmenen aikana ennakoitua nopeammin, mutta samanaikaisesti huoli metsien elinvoimaisuuden säilymisestä on voimakkaasti lisääntynyt. Epävarmuutta metsien tulevasta kehityksestä aiheuttavat erityisesti ilman epäpuhtauksista johtuva kuormitus ja ilmaston ennustettu lämpeneminen.

Epätietoisuus ympäristön tilassa tapahtuvista muutoksista ja niiden merkityksestä on ylläpitänyt vilkasta julkista keskustelua, johon tutkimus on monien mielestä pystynyt tuomaan uutta tietoa kiusallisen hitaasti. Vaikka ilman epäpuhtauksien haitallisuudesta sinänsä ei ole epäilystä, erilaisten metsävaurioiden syy-yhteyksien selvittäminen on hyvin moniulotteinen ongelma. Luotettavien tulosten saamista vaikeuttaa se, että luonnossa ilmenee suurta ajallista vaihtelua. Monet vaikutukset ilmenevät vasta hitaasti kumuloituvina, joten niihin liittyvät ilmiöt ovat luotettavasti selitettävissä vasta pitkien aikasarjojen avulla. Lisäksi ympäristömuutosten seuraamuksia tutkittaessa olisi hallittava mittakaava, joka ylittää molekyyli- ja solutasolta globaaleihin mittoihin.

Tämän vuosikymmenen alussa Metsäntutkimuslaitos määritteli tutkimustoimintansa yhdeksi painoalaksi metsien terveydentilan sekä sitä uhkaavien tekijöiden vaikutustapojen ja torjuntamahdollisuuksien tutkimisen. Tämä päätös oli luonnollista jatkoa ILME-projektin (Ilman epäpuhtauksien vaikutus metsiin) 1980-luvun puolivälissä käynnistämän tutkimuksen jatkamiseksi ja kehittämiseksi (Hyvärinen ym. 1993). Metsien elinvoimaisuutta selvittävät monitieteelliset tutkimushankkeet muodostavat metsien terveydentilan tutkimusohjelman.

Yleistavoitteet

Vuonna 1992 perustetun metsien terveydentilan tutkimusohjelman tehtävänä on:

- tuottaa sekä valtakunnallisesti että alueellisesti edustavaa tietoa metsien terveydentilasta ja elinvoimaisuudesta,
- laatia ennusteita metsien terveydentilan ja kasvun kehityksestä metsätaloutta varten,
- tutkia metsävaurioiden syy-yhteyksiä ja kehittää tunnuksia puiden elinvoimaisuuden määrittämiseksi,
- kehittää metsän- ja maanhoidon menetelmiä metsien elinvoimaisuuden ylläpitämiseksi ja parantamiseksi,
- edistää alan kotimaista ja kansainvälistä tutkimusyhteistyötä.

Tutkimushankkeet

Tutkimusohjelma koostuu määräaikaista hankkeista, joita toteutetaan vastuututkijan johdolla. Seuraavassa selostetaan lyhyesti eri hankkeiden keskeisimpiä tavoitteita.

1. Valtakunnalliset hankkeet

Metsävarojen inventointitietojen ytimenä on pysyvä näytealaverkko, jota käytetään tutkimuskohteiden otantakehikkona alueellista edustavuutta edellyttävissä metsien terveydentilan tutkimuksissa. Pysyvään näytealaverkkoon perustuvaa tietoa voidaan koostaa suuralueita tai koko maata koskevaan tarkasteluun. Toisaalta valtakunnallinen tietopohja muodostaa hyvän vertailutason alueellisille tuloksille. Samalla kaikki inventoinnissa hankittu puusto- ja kasvupaikkatieto on keskitetysti käytettävissä.

Metsien elinvoimaisuus (FK Martti Lindgren)

Hanke tuottaa vuosittain tietoa metsien elinvoimaisuuden alueellisesta ja ajallisesta vaihtelusta inventoimalla puiden yleisiä kuntotunnuksia, kuten esim. harsuuntumista, neulasten värioireita sekä abiottisia ja biottisia tuhoja. Lisäksi tutkitaan puuston ravinnetilan kehitystä, selvitetään metsätuhojen esiintymistä ja niihin vaikuttavia tekijöitä sekä kehitetään metsien elinvoimaisuuden seurantamenetelmiä.

Metsäkasvillisuus ja metsikkökarike ympäristöindikaattoreina (FT Eeva-Liisa Jukola-Sulonen)

Tavoitteena on metsän pintakasvillisuuden lajiston, epifyyttijäkälien esiintymisen sekä karikkeen määrän ja laadun muutosten selvittäminen pitkällä aikavälillä sekä muutosten syiden analysointi. Kasvillisuuden muutoksia tarkastellaan suhteessa kasvuympäristössä esiintyviin gradientteihin, kuten esimerkiksi maaperän ja puuston ominaisuuksiin sekä laskeuman määrään ja laatuun.

Metsämaiden viljavuus ja happamoituminen (MMT Pekka Tamminen)

Tavoitteena on selvittää metsämaiden morfologisia, fysikaalisia ja kemiallisia ominaisuuksia sekä arvioida puuston sukkession, metsänhoidon toimenpiteiden ja ilman epäpuhtauksien aiheuttamia muutoksia maaperässä. Maaperätunnusten avulla voidaan myös selittää puuston kuntoa ja kasvua sekä pintakasvillisuuden lajistoa ja niissä ajan mittaan ilmeneviä muutoksia.

Raskasmetallikartoitukset bioindikaattorien avulla (FT Eero Kubin)

Hanke tuottaa sammal-, jäkälä- ja kaarnanäytteiden avulla tietoa raskasmetallilaskeumasta ja sen alueellisista eroista, ja selvittää kuormituksessa ilmeneviä muutoksia eri ajanjaksoina. Lisäksi tutkitaan raskasmetallilaskeuman vaikutuksia metsäluontoon. Hanke kuuluu osana yhteispohjoismaiseen raskasmetallitutkimukseen.

2. Alueelliset hankkeet

Alueelliset hankkeet tuottavat tietyiltä alueilta yksityiskohtaisempaa tietoa metsien kunnosta kuin mitä valtakunnallinen tutkimus antaa. Näissä hankkeissa hyödynnetään myös mahdollisimman paljon valtakunnallista näytealaverkkoa tulosten vertailukelpoisuuden parantamiseksi ja mittaustyön määrän rajoittamiseksi. Näin alueellisetkin hankkeet tuottavat osa-aineistoja valtakunnallisia tarkasteluja varten.

Itä-Lapin metsävaurioprojekti (FL Eero Tikkanen)

Tavoitteena on selvittää Kuolan alueen päästöjen vaikutus Lapin metsien elinvoimaisuuteen ja terveydentilaan. Sen ohessa tuotetaan myös yleisempää tietoa Lapin luonnosta ja siinä tapahtuvista muutoksista. Edellisten lisäksi hankkeen tavoitteisiin kuuluu myös Venäjän puoleisten vaurioalueiden paikantaminen ja rajaaminen. Hanke toteutetaan yhteistyössä Kuolan alueen ympäristötutkijoiden kanssa.

Länsi-Suomen metsien terveydentila (FT Hannu Raitio)

Hankkeessa kartoitetaan Satakunnan happamoitumiselle herkkien metsien sekä Merenkurkun rannikko- ja saaristometsien terveydentilaa, seurataan siinä tapahtuvia muutoksia, ja tutkitaan alueella havaittujen metsävaurioiden syitä. Lisäksi selvitetään Merenkurkun alueella vallitsevien erityisolojen vaikutuksia metsien elinvoimaisuuteen yhteistyössä Ruotsin maatalousyliopiston kanssa.

Karjalan metsien terveydentila (FT Ilari Lumme)

Tavoitteena on selvittää Suomen Karjalan ja Kainuun sekä Karjalan tasavallan ja Leningradin alueen metsien terveydentilaa, mitata metsiin tulevan kuormituksen määrää ja laatua sekä selvittää kuormituksen vaikutusta kasvillisuuteen ja maaperään päästöjen vähentämisvaatimusten perusteiksi ja rajoitustoimenpiteiden kohdentamiseksi. Hanke on suomalais-venäläinen yhteistutkimus.

3. Ekosysteemitutkimukset

Näissä hankkeissa pyritään selvittämään mm. vaurio-oireiden diagnostiikkaa, ekosysteemin toimintaa erilaisissa kuormitusoloissa, kuormituksen kriittisiä rajoja sekä mahdollisuuksia lieventää metsävaurioita turvaamalla tasapainoinen ravinteiden saatavuus.

Ilman epäpuhtauksien vaikutus metsäekosysteemin toimintaan (MMT Heljä-Sisko Helmisaari)

Tavoitteena on selvittää metsäekosysteemin toimintaa ja ilman epäpuhtauksien vaikutuksia siihen tutkimalla metsikön ja puun ravinnekiertoa, määrittämällä puiden hienojuurten ominaisuuksia, määrää ja kasvudynamiikkaa sekä niiden yhteyttä eri ympäristötekijöihin. Lisäksi tutkitaan ilman epäpuhtauksien vaikutusmekanismeja ja eri haittatekijöiden aiheuttamia solutasoisia rakennemuutoksia.

Soluvaurioiden diagnostiikka - kokeelliset altistukset (FT Sirkka Sutinen)

Hanke keskittyy mikroskooppisen diagnostiikan kehittämiseen ja varmistamiseen luonnossa esiintyvien soluvaurioiden syy/seuraussuhteiden selvittämiseksi. Pääta-voitteina on tutkia kuivuuden, pakkasen, lisääntyneen UV-B-säteilyn, otsonin ja orgaanisten hiilivetyjen aiheuttamia solutasoisia vaikutuksia yksin ja eri yhdistelminä sekä määrittää vaurioiden vakavuusaste suhteessa saastepitoisuuksiin ja vaikutusai-kaan.

Metsäekosysteemin typensietokyky (MMT Aino Smolander)

Hankkeessa pyritään selvittämään, millaisen riskitekijän typikuormitus ajan mittaan aiheuttaa metsäekosysteemin kehitykselle. Keskeisimpiä kysymyksiä ovat typpi-kuormituksen vaikutus metsämaan nitrifikaatiopotentiaaliin ja happamoitumiskehi-tykseen, ja miten avohakkuu vaikuttaa tyvellä kyllästetyssä metsikössä typen mine-ralisaatioon, nitrifikaatioon, huuhtoutumiseen ja happamoitumiseen.

Metsän terveyslannoitus (prof. Eino Mälkönen)

Tavoitteena on selvittää, miten ns. kunnostuslannoituksilla voitaisiin estää tai lieven-tää ilman epäpuhtauksista, bioottisista tekijöistä yms. aiheutuvia metsävaurioita ja turvata metsien hyvä kasvukunto. Keskeisimpiä kysymyksiä ovat, miten ravinnelisä-yksillä voidaan parantaa puuston elinvoimaisuutta ja vastustuskykyä, lieventää maan happamoitumiskehitystä, edistää maan biologista aktiivisuutta ja ylläpitää tasapai-noista ravinnekiertoa.

Ympäristön yhdennetty seuranta (Ph D Michael Starr)

Tämä hanke on osa kansainvälistä seurantatutkimusta, joka kuuluu YK-ECE:n ympäristönsuojelun yhteistyöhön. Sen kokonaistavoitteena on selvittää ympäristön tilan muutoksia luonnontilaisilla valuma-alueilla. Hanke vastaa puuston, maaperän ja maaveden tutkimuksesta Suomessa sijaitsevilla yhdennetyn seurannan valuma-alu-eille perustetuilla näytealoilla.

Tutkimushankkeet ajoittuvat vuosille 1992-1996 lukuunottamatta Itä-Lapin metsävaurio-projektia, joka päättyy vuonna 1994 (Kauhanen ja Varmola 1992). Tutkimusohjelma jul-kaisee väliraportin hankkeiden edistymisestä syksyllä 1994.

Metsien terveydentilan seuranta

Metsien terveydentilan valtakunnallinen seurantajärjestelmä perustuu osin edellä esiteltyihin tutkimushankkeisiin ja metsien kahdeksannessa inventoinnissa (VMI8) vuosina 1985-1986 perustettuun näytealaverkkoon. Seurannan kohteet, laajuus ja aikataulu voidaan tiivistää seuraavaan asetelmaan.

<i>Valtakunnan metsien inventointi (VMI8)</i>		Näytealoja, kpl	Toistamis- jakso, vuotta
Tilapäiset näytealat	(1986-1994)	70 000	
Pysyvät näytealat	(1985-1986)	3 000	5

VMI:n näytealoista on eri tarkoituksia varten otettu seuraavia otoksia:

1. Puiden elinvoimaisuus

Harsuuntuminen, neulasikäluokkien määrä, neulasten väriviat, abioottiset ja bioottiset tuhot

Tilapäiset näytealat	(1986-1994)	50 000	
Pysyvät näytealat	(1985-1986)	3 000	5
"	(1986-)	450	1
Puiden ravinnetila (neulasanalyysi)			
Pysyvät näytealat	(1987,-88,-89)	160	5
"	(1992-)	20	1

2. Maan ravinteisuus, happamoituminen

Pysyvät näytealat	(1985-1989)	550	10
"	(1994-1996)	1 000	

3. Kasvillisuuden inventointi

Pintakasvillisuus

Pysyvät näytealat	(1985-1986)	3 000	10
"	(1993-1996)	200	5

Epifyyttijäkälät

Pysyvät näytealat	(1985-1986)	3 000	10
-------------------	-------------	-------	----

4. Raskasmetallikartoitukset (sammalet, jäkälät)

Pysyvät näytealat	(1985-1986)	3 000	5
-------------------	-------------	-------	---

Seurantatehtävät perustuvat pääosiltaan kansainvälisiin sopimuksiin ja niissä määriteltyihin velvoitteisiin.

Resurssit

Tutkimusohjelman eri hankkeisiin osallistuu METLA:sta kaikkiaan yli 50 tutkijaa, joten ongelmia on selvittämässä hyvin monipuolinen asiantuntijajoukko. Lisäksi kaikissa tutkimushankkeissa on yhteistyötä niin koti- kuin ulkomaisten yliopistojen tai tutkimuslaitosten kanssa.

Tutkimusohjelman budjetti vuodelle 1993 on 15,4 milj. mk, josta 4,3 milj. mk on saatu ulkopuolisena rahoituksena monista eri lähteistä.

Kirjallisuus

- Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkeliä, H. & Nieminen, T. (toim.) 1993. Metsäluonto ja ilmansaasteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446. 221 s.
- Kauhanen, H. & Varmola, M. (toim.) 1992. Itä-Lapin metsävaurioprojektin väliraportti. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 413. 269 s.

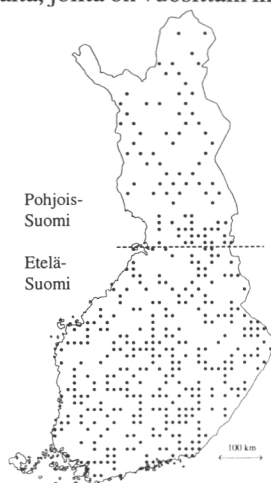
Metsiemme elinvoima. Tilannearviointi vuosilta 1986-1993

Martti Lindgren ja Maija Salemaa
Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto
PL 18, 01301 Vantaa

Uudentyyppiset metsävauriot

Keski-Euroopassa havaittiin 1970- ja 1980-lukujen vaihteessa paikoitellen selvää metsien kunnon heikentymistä (Krause ym. 1986). Teollisuusalueille tyypillisten savukaasutuhojen lisäksi ns. uudentyyppisiä metsävaurioita ilmeni myös kaukana päästölähteistä. Metsien oireilua on tutkittu laajoissa projekteissa ja useita hypoteeseja metsävaurioiden syistä on esitetty (Hinrichsen 1986, Klein ja Perkins 1987, Führer 1990). Jos oireita ei ole voitu selittää millään biologisella tuhonaiheuttajalla tai ilmastotekijöillä, kaukokulkeutuneiden ilman epäpuhtauksien on epäilty olleen ainakin osasyynä oireiden syntyyn. Tällöin happaman laskeuman, kaasumaisten epäpuhtauksien, ravinnepuutoksien tai maaperän liukoisen alumiinin lisääntymisen vaikutukset metsäekosysteemiin ovat olleet tutkimuksen kohteena. Ilman epäpuhtauksien vaikutuksien on todettu kytkeytyvän myös ilmasto- ja sääoloihin sekä metsien luontaiseen vanhenemiseen (Andersson 1988). Uudentyyppisten ja perinteisten metsävaurioiden erottaminen toisistaan on osoittautunut vaikeaksi tehtäväksi ja useat tutkijat korostavatkin vaurioiden syiden vaihtelevan tapauskohtaisesti ja puulajista riippuen (Innes 1993).

Vaikka uusimpien raporttien mukaan Euroopan metsätuhot ovat rajoittuneet huomattavasti pienemmille pinta-aloille kuin aikaisemmin pelättiin (Innes 1993), puiden harsuuntuminen ja värioireet ovat yleisiä monissa maissa (Forest condition ... 1993). Nykyään Euroopassa tutkitaan metsien kuntoa yhteisin YK-ECE:n suosittelin menetelmin 31:ssä maassa. Metsäntutkimuslaitos on osallistunut tähän metsien tilan seurantaohjelmaan vuodesta 1985 selvittämällä vuosittain Suomen metsien kuntoa. Seuranta-aineisto on kerätty noin 400:ltä kangasmaiden pysyvältä näytealalta, joilta on vuosittain inventoitu noin 4500 puuta (kuva 1).



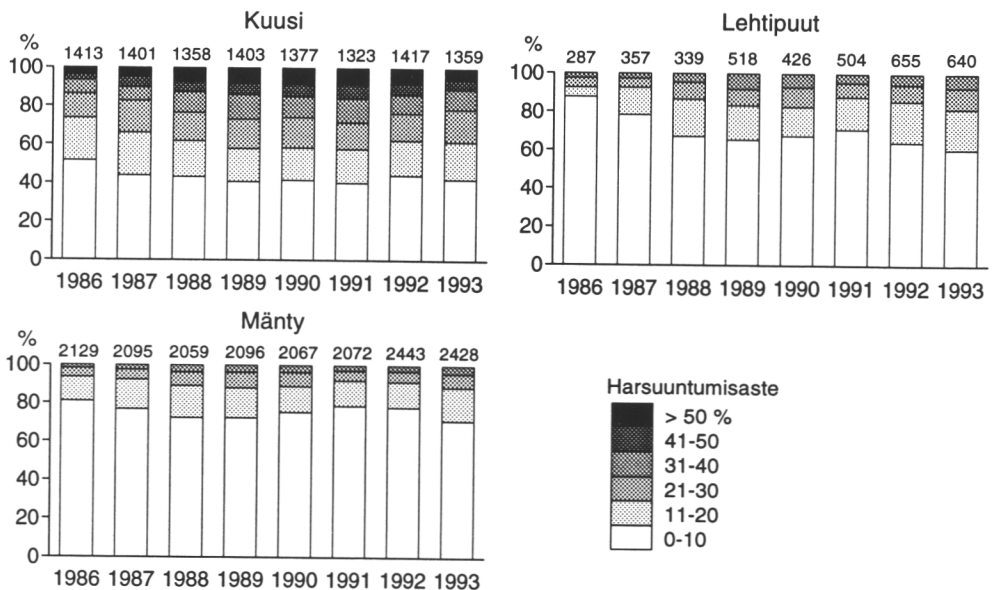
Kuva 1. Kangasmaiden näytealaverkko, jolla metsien terveydentilaa seurataan vuosittain. Näytealat ($n = 402$) ovat otos valtakunnan metsien inventoinnin pysyvistä näytealoista. Puulajisuhteet vaihtelevat eri näytealoilla (vrt. kuva 3). Etelä- ja Pohjois-Suomen välinen raja noudattaa 65° leveyspiiriä.

Elinvoimaisuuden tutkiminen

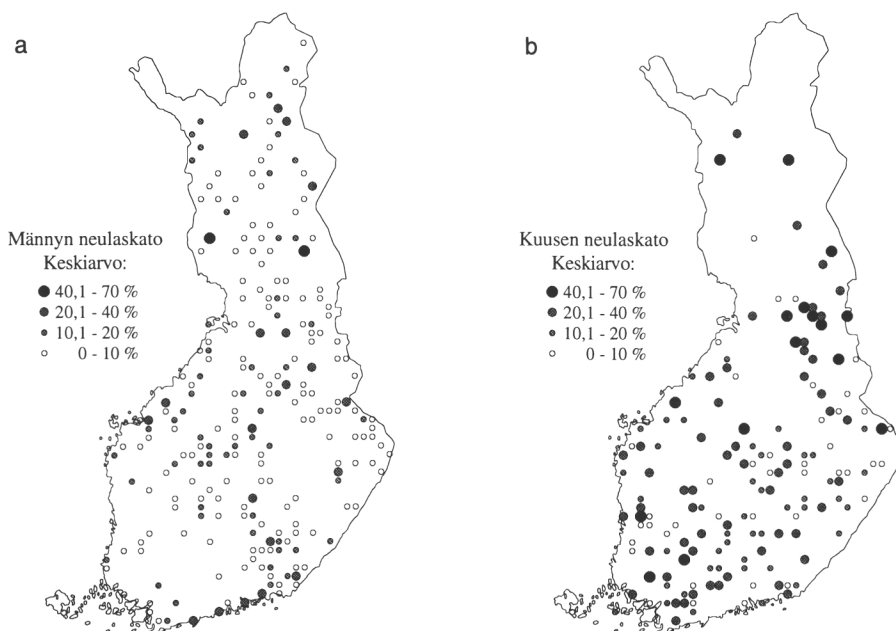
Puiden elinvoimaisuudella tarkoitetaan niiden kykyä pysyä elossa, kasvaa iänmukaisesti ja tuottaa itämiskykyisiä siemeniä (Salemaa ym. 1993). Latvuksen kunto vaikuttaa moniin puiden keskeisiin elintoimintoihin ja kasvupotentiaaliin. Tämän vuoksi latvuksien harsuuntuminen eli suhteellinen neulas- ja lehtikato sekä neulasten ja lehtien värioireet ovat tärkeimmät elinvoimatunnukset, joita käytetään laajojen metsäalueiden yleisen terveydentilan seurannassa (Hanisch ja Kilz 1990). Suomessa näiden lisäksi seurataan neulasvuosikertojen määrää, käpysatoa ja erilaisia tauteja sekä hyönteistuhoja. Bioindikaattoreina käytetyt epifytyttäjäkälät ja neulasilla kasvava viherlevä antavat lisätietoa metsien tilasta. Tutkimalla elinvoimatunnusten alueellista ja ajallista vaihtelua suhteessa ilman epäpuhtauksien laskeumaan ja muihin ympäristötekijöihin, selvitetään vaurioherkempien metsien sijaintia ja mahdollisia syitä havaituille muutoksille. Varsinaisten syy/seuraussuhteiden osoittaminen edellyttää tämän lisäksi intensiivistä ekosysteemitutkimusta ja kokeellista lähestymistapaa.

Harsuuntuminen ja väriviat Suomessa

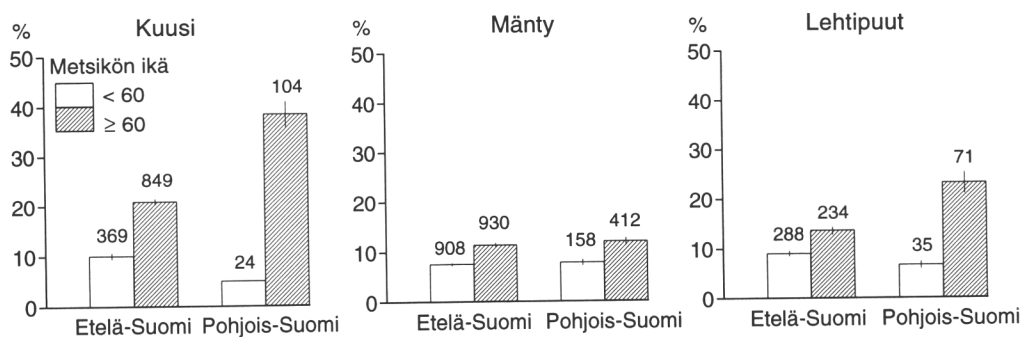
Pohjoismaissa puuta pidetään harsuuntuneena, kun sen lehti- tai neulasmäärä on 20 % pienempi kuin normaalipuiden. Kesällä 1993 tällaisten kuusien osuus oli 38 %, mäntyjen 12 % ja lehtipuiden 18 % (kuva 2). Mäntyjen keskimääräinen harsuuntumisaste oli 10 %, kuusien 19 % ja lehtipuiden 12 %. Etelärannikolla ja Pohjanmaan rannikolla sijaitsevat männiköt ovat harsuuntuneempia kuin muualla Etelä-Suomessa. Eteläisen Lapin männiköt ovat suhteellisen vähän harsuuntuneita, mutta neulaskato on runsaampaa pohjoisimmilla näytealoilla (kuva 3a). Kainuu erottuu voimakkaasti harsuuntuneiden kuusikoiden alueena (kuva 3b). Kaikkialla maassa on kuitenkin yksittäisiä näytealoja, joilla puusto on harsuuntunutta. Vanhat metsät ovat harsuuntuneempia kuin nuoret (kuva 4).



Kuva 2. Kuusen, männyn ja lehtipuiden harsuuntumisen frekvenssijakaumat (%) kangasmetsissä vuosina 1986-1993. Näytepuiden lukumäärä on merkitty pylvään päälle.



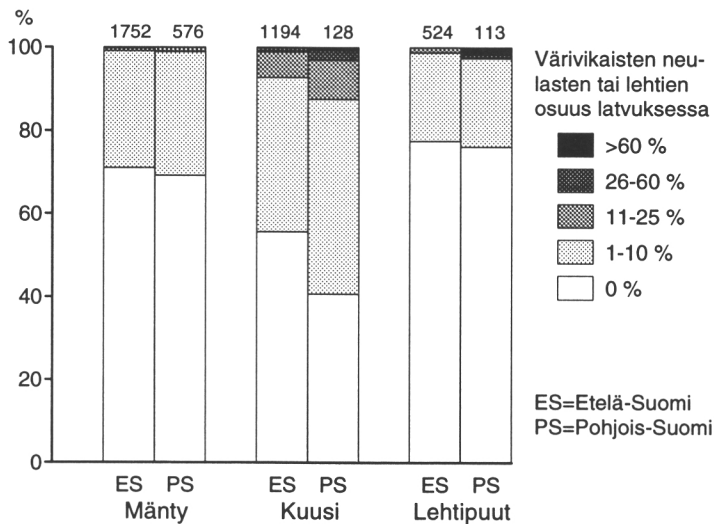
Kuva 3. Männyn (a) ja kuusen (b) harsuuntumisen keskiarvot näytealoilla vuonna 1993. Puiden lukumäärä näytealalla vaihteli 3-38 ja oli keskimäärin 9. Lapissa otokseen on tullut vähän kuusikoita.



Kuva 4. Kuusen, männyn ja lehtipuiden keskimääräinen harsuuntumisaste (keskiarvo merkitty pylväällä ja keskiarvon keskivirhe janalla) alle ja yli 60-vuotiaissa metsissä Etelä- ja Pohjois-Suomessa (ks. kuva 1). Näytepuiden lukumäärä on merkitty pylvään päälle. Aineisto vuodelta 1993.

Seurantajakson 1986-93 aikana Suomen metsäpuiden harsuuntumisaste on jonkin verran vaihdellut vuodesta toiseen (kuva 2). Tutkimuksen alkuvuosina 1986-89 harsuuntuminen lisääntyi kaikilla puulajeilla. Lapissa ilmeni voimakas paikallinen neulaskato kesällä 1987. Tämän jälkeen latvukset tuuheutuivat muutaman vuoden ajan. Lehtipuilla harsuuntuminen lisääntyi uudelleen vuosina 1992-93. Myös männyn harsuuntuminen lisääntyi lievästi vuonna 1993. Kuusten harsuuntumisaste on puolestaan pysynyt lähes muuttumattomana viime vuodet. Yli 20 % harsuuntuneiden puiden osuus on lisääntynyt männyllä 5, kuusella 12 ja lehtipuilla 11 %-yksikköä vuosien 1986 ja 1993 välillä. Havaitut muutokset ovat suurempia kuin mitä voidaan selittää pelkästään satunnais- ja arviointivirheillä. Neulaskadon voimistuminen on kohdistunut pääasiassa vanhoihin ja ennestään harsuuntuneisiin puihin. Neulasten varisemisen luontaista vaihtelua ei kuitenkaan tunneta vielä riittävän hyvin, jotta vuosivaihtelu voitaisiin erottaa pitkän aikavälin kehityksestä.

Viime vuosina havupuiden neulasten voimakkaita värioireita on ollut vähän. Vuonna 1993 1 % männystä ja 8 % kuusista oli värikkäisiä (kuva 5). Lehtipuilla kellastumisoireita tavattiin 1,5 %:lla. Kuusella väriviat olivat yleisimpiä harsuuntuneilla ja vanhoilla puilla. Alikasvoskuusien värikkäisyys oli yleisintä kuivahkoilla kankailla.



Kuva 5. Värikkäisten kuusten, mäntyjen ja lehtipuiden osuudet (%) vuonna 1993. Kansainvälisten ohjeiden mukaan värikkäisiä neulasia tai lehtiä tulee olla latvuksessa yli 10 % (pylväiden kolme tummintaa osaa) ennenkuin puu luokitellaan oireelliseksi. Näytepuiden lukumäärä on merkitty pylvään päälle.

Harsuuntuminen muissa Euroopan maissa

Suomessa havupuiden harsuuntuminen oli tutkimusjakson aikana Euroopan maiden keskitasoa. YK-ECE:n ohjeistossa puuta pidetään vaurioituneena, kun se on menettänyt yli 25 % neulasistaan (Forest condition ... 1993). Vuoden 1992 tilastossa lähes puolet Euroopan

maista, esimerkiksi Norja, Viro, Saksa ja Puola kuuluvat ryhmään, jossa vaurioituneiden puiden osuus on yli 20 %. Synkin tilanne on Tsekin tasavallassa, jossa miltei 60 % havuista on vaurioituneita. Suomessa ja Ruotsissa osuus on 10-20 %. Koska neulaskadon arviointi on subjektiivista ja ilmastolliset olot vaihtelevat eri alueilla, maiden välisiä vertailuja on tehtävä varovaisesti.

Metsien kuntoon vaikuttavat tekijät

Paikallisten päästölähteiden lähialueita, taajamia ja teiden varsia lukuunottamatta harsuuntuminen johtuu Suomessa pääasiassa puuston ikäänymisestä sekä erilaisista, puille epäedullisista ilmasto- ja säätekijöistä. Versosurmataudin 1980-luvun epidemian jälkiä näkyy vielä Länsi-Suomen männiköissä. Koko maata tarkasteltaessa ei ole havaittu merkitsevää yhteyttä ilman epäpuhtauksien ja metsien neulaskadon välillä. Sen sijaan eteläisessä Suomessa mallilaskelmiin perustuvien rikki- ja typpilaskeumien ja männyn neulaskadon välillä on yhteyttä (taulukko 1).

Taulukko 1. Spearmanin järjestyskorrelaatio männyn ja kuusen keskimääräisen näytealakohtaisen harsuuntumisasteen (1993), vuosien 1986-93 välisen keskimääräisen harsuuntumisen muutoksen (lisääntyvä suuntaus) ja kotimaisen rikki- ja typpilaskeuman välillä. Kokonaisrikin (S) ja typen (NH₄-N, NO_x-N ja näiden summa N yht.) laskeumat näytealoilla perustuvat happamoitumisen kokonaismallin (HAKOMA) arviointiin, jossa on käytetty vuoden 1990 päästötietoja (VTT:n ja Ilmatieteen laitoksen julkaisematon aineisto). Etelä- ja Pohjois-Suomen aineistot on käsitelty erikseen. Koko Suomen aineistossa korrelaatiot eivät olleet kummallakaan puulajilla merkitseviä. Tilastolliset merkitsevyydet: * = P < 0.05, ** = P < 0.01.

Laskeuma kotimaisista lähteistä	S	NH ₄ -N g/m ² /v.	NO _x -N	N yht.	Näyte- aloja, kpl
Mänty, kaikki ikäluokat					
Pohjois-Suomi					
Harsuuntumisaste 1993	-0,177	-0,124	-0,144	-0,134	68
Hars. muutos 1986-93	0,225	0,249	0,255*	0,247	62
Etelä-Suomi					
Harsuuntumisaste 1993	0,255**	0,213**	0,143	0,204**	161
Hars. muutos 1986-93	0,111	0,188*	0,126	0,212*	129
Kuusi, kaikki ikäluokat					
Pohjois-Suomi					
Harsuuntumisaste 1993	-0,186	-0,113	0,157	-0,018	18
Hars. muutos 1986-93	-0,283	-0,267	0,024	-0,162	16
Etelä-Suomi					
Harsuuntumisaste 1993	0,013	0,108	0,042	0,113	138
Hars. muutos 1986-93	0,028	0,058	0,202*	0,095	127

Vaikka metsäpuiden yleinen terveydentila Suomessa on tämän seurantatutkimuksen mukaan tyydyttävä, metsäekosysteemin herkimmissä osissa voidaan havaita erilaisia stressin oireita. Karuilla kasvupaikoilla on havaittu neulasten värioireita. Oireiden taustalla saattaa kuivuusstressin lisäksi olla ravinnehäiriöitä. Ilman epäpuhtauksille herkät naavamaiset jäkälät ovat taantuneet Etelä-Suomessa (Kuusinen ym. 1990) ja neulasten pinnalla kasvaa varsinkin etelä- ja lounaisrannikolla levää, joka viittaa kohonneeseen typpilaskeumaan (Jukola-Sulonen ym. 1993). Bioindikaattoreiden reaktiot kertovat myös metsäpuiden elinympäristön hitaasta muuttumisesta.

Kirjallisuus

- Andersson, B. 1988. Defoliation of coniferous trees. Assessments 1984-1987. National Swedish Environmental Protection Board. Report 3533. 28 s.
- Forest condition in Europe. 1993. Results of the 1992 survey. CEC-UN/ECE. 90 s.+ liitteet I-III.
- Führer, E. 1990. Forest decline in central Europe: additional aspects of its cause. *Forest Ecology and Management* 37: 249-257.
- Hanisch, B. & Kilz, E. 1990. Waldschäden erkennen. Fichte und Kiefer. Verlag Eugen Ulmer. Stuttgart. 334 s.
- Hinrichsen, D. 1986. Multiple pollutants and forest decline. *Ambio* 15: 258-265.
- Innes, J. 1993. Air pollution and forests-an overview. Julkaisussa: Schlaepfer, R. (toim.). Long-term implications of climate change and air pollution on forest ecosystems. IUFRO World Series 4: 77-100.
- Jukola-Sulonen, E.-L., Kuusinen, M. & Merilä, P. 1993. Leväpeite kuusen neulasilla merkki typikuormasta. Julkaisussa: Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkilä, H. & Nieminen, T. (toim.). Metsäluonto ja ilmansaasteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446: 148-149.
- Klein, M. & Perkins, T.D. 1987. Cascades of causes and effects of forest decline. *Ambio* 16(2-3): 86-93.
- Krause, G., Ardnt, U., Brandt, C., Bucher, J., Kenk, G. & Matzner, E. 1986. Forest decline in Europe: development and possible causes. *Water, Air, and Soil Pollution* 31: 647-668.
- Kuusinen, M., Mikkola, K. & Jukola-Sulonen, E.-L. 1990. Epiphytic lichens on conifers in the 1960's to 1980's in Finland. Julkaisussa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. s. 397-420.
- Salemaa, M., Jukola-Sulonen, E.-L., Nieminen, T. & Nöjd, P. 1993. Latvustunnukset ja puun kasvu elinvoimaisuuden ilmentäjinä. Julkaisussa: Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkilä, H. & Nieminen, T. (toim.). Metsäluonto ja ilmansaasteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446: 77-92.

Tuhojen esiintyminen Etelä-Suomen metsissä VMI:n tulosten mukaan

Hannu Yli-Kojola

**Metsäntutkimuslaitos, Metsien käytön tutkimusosasto
Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki**

Valtakunnan metsien inventointi (VMI) on jatkuva Suomen metsien puuvarojen ja tilan seurantajärjestelmä, joka perustuu systemaattiseen otokseen. Ensimmäinen koko maan kattava inventointi on tehty vuosina 1921-24. Nyt käynnissä oleva 8. inventointi aloitettiin vuonna 1986 ja se päättyi 1994. Etelä-Suomen alueelta on vuosina 1986-92 mitattu 43 212 näytealalta 356 950 puuta, joista tuhot määritettiin 49 801:stä ja harsuuntuminen 30 267:stä puusta.

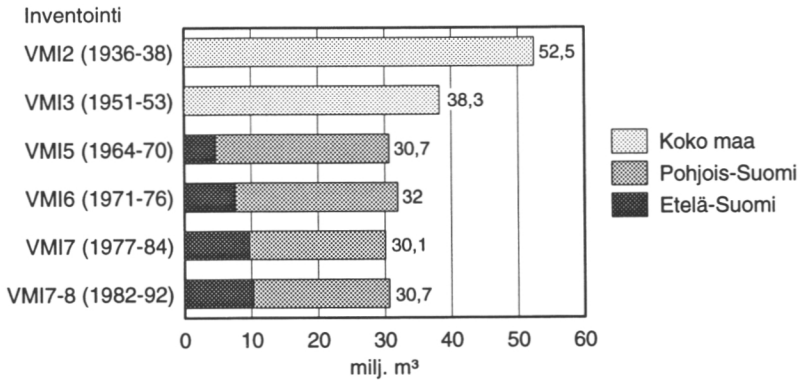
Inventointi tehdään ns. lohkoinventointina, jossa näytealat on sijoitettu systemaattisesti sijaitseville lohkoille (Valtakunnan metsien... 1991). Niiden väli ja myös näytealamäärä lohokolla vaihtelee maan eri osissa. Etelä-Suomen alueella lohkoväli on 7 x 8 km ja lohkon 21 näytealaa sijaitsevat 200 m:n välein. Yksi näyteala mitattiin jokaista 266 ha kohden. Näytepuut valitaan relaskoopilla, joten valinta painottuu isompiin puihin. Alle 1,3 m:n pituisia puita ei mitata. Kuviotietojen perusteella saadaan pinta-alatiedot.

Inventoinnissa kuvataan näkyvien tuhojen esiintymistä näytepuissa ja metsikkökuvioilla. Tuhoista määritetään ilmiasu, aiheuttaja ja vakavuusaste. Erikseen arvioidaan puiden harsuuntuneisuus. Näytepuiden perusteella voidaan tarkastella tuhojen esiintymistä puustossa. Kuviotiedoista saadaan erilaisia tuhoja sisältävien metsien osuudet metsämaan kokonaisalasta.

Etelä-Suomen maa-alasta on 71,5 % metsämaata ja 3,6 % kitumaata. Metsätalousmaa sisältää näiden lisäksi myös joutomaan. Elävän puuston kokonaistilavuuden arvio on 1331 milj. m³, mistä kitumaalla on 10 milj. m³. Metsämaata on 11,5 milj. ha ja kitumaata 0,6 milj. ha (Salminen 1993, Aarne 1993). Metsämaan pinta-alasta yli 40-vuotiaita metsiä on 61 % ja niiden osuus puuston kokonaistilavuudesta on 85 %. Kasvatusmetsiä ja uudistuskypsiä metsiä on metsämaan pinta-alasta 77 % ja puuston kokonaistilavuudesta 97 %. Metsistä on mäntyvaltaisia 57 %, kuusivaltaisia 33 % ja lehtipuuvaltaisia 8 %. Vallitsevien latvuserosten puut muodostavat 81 %, välipuut 10 % ja aluspuut 4 % puuston kokonaistilavuudesta.

Tuhojen esiintyminen puustossa

Etelä-Suomen metsissä luonnonpoistuman eli vähintään polttopuiksi kelpaavan yli 1,3 m:n pituisen kuolleen puuston määräksi arvioitiin 10,3 milj. m³, kun se 7. inventoinnissa vuosina 1977-82 oli 9,7 milj. m³ (kuva 1). Puuston kokonaistilavuudesta luonnonpoistumapuun osuus on 0,8 %, mikä on pysynyt suunnilleen samana viimeisten 20 vuoden aikana. Luonnonpoistumasta on Etelä-Suomen alueella pystykuolleita 73 % ja kaatuneita sekä katkenneita 27 %. Koko maan metsissä luonnonpoistumapuun määrä on pysynyt noin 30 milj. m³:nä viimeisten 30 vuoden aikana. Sen osuus puuston kokonaistilavuudesta on pienentynyt 2,1 %:sta 1,8 %:iin. Pohjois-Suomessa on kelo puuta runsaasti, kuollutta puuta on siellä selvästi enemmän kuin Etelä-Suomessa. Metsien tehostuneen hoidon myötä kuolleen puun määrä on vähentynyt selvästi sotia edeltäneestä ajasta.



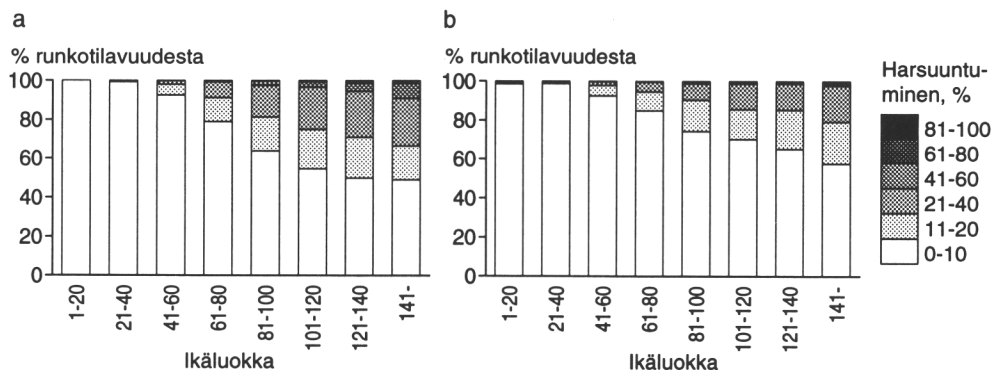
Kuva 1. Käyttökelpoisen kuolleen puuston määrä Suomen metsissä eri inventoinneissa 1936-1992.

Lahopuun määrää ei inventoinnissa saada tarkalleen selvitettyä. Lahoja sisältävän puuston osuus oli 4,2 % kokonaistilavuudesta, mikä on vähemmän kuin edellisessä inventoinnissa. Varsinaista lahoppuuta tästä on vain osa. Männystistä oli lahoja 0,5 %, kuusista 3,1 % ja lehtipuista 15,1 %.

Puiden elinvoiman arvioimiseksi tarkasteltiin valtapuiden mäntyjen ja kuusien harsuuntuneisuutta (Yli-Kojola 1993). Koko puuston tilavuudesta nämä puut edustavat 68 %:a. Puiden harsuuntuminen liittyy luonnollisena osana niiden kehitykseen, mutta myös ilman epäpuhtaudet voivat sitä lisätä. Harsuuntuminen alkaa puilla 40-50 vuoden iässä ja lisääntyy iän myötä (kuva 2). Harsuuntumisaste oli yli 10 % noin 27 %:lla tarkasteltavana olleitten kaikkien kuusten tilavuudesta ja 20 %:lla mäntyjen tilavuudesta. Runkolukumääristä vastaavat prosentit ovat 14 ja 7. Kuuset ovat harsuuntuneempia kuin männyt. Tilavuuksista laskettuna isommat ja harsuuntuneimmat puut painottuvat voimakkaammin kuin runkolukumääristä laskettuna, minkä vuoksi tilavuuteen perustuvat prosenttiarvot ovat suurempia. Yli 100-vuotiailla puilla harsuuntumisaste oli yli 10 % kuusista 47 %:lla ja männyistä 34 %:lla sekä harsuuntumisaste yli 40 % kuusista 5 %:lla ja männyistä 2 %:lla.

Tehtäessä puiden harsuuntumisen vertailuja eri alueiden tai aineistojen kesken voi puujoukon ikärakenteissa olla suuria eroja. Tämän vuoksi puiden määriä tulisikin tarkastella ikä- tai läpimittaluokittain.

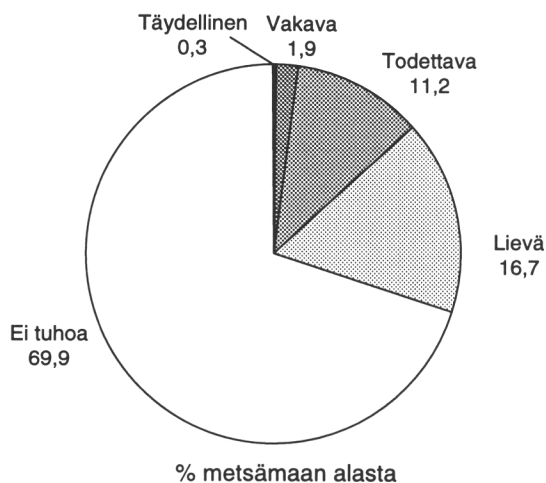
Vaurioituneiden puiden osuus oli yhteensä 26 % puuston kokonaistilavuudesta. Kuolleiden puiden lisäksi arvioitiin kuolevaa puustoa olevan noin 1 %, vaurioita jättäviä tuhoja 14 %:lla ja lieviä tuhoja 10 %:lla puustosta. Eniten esiintyi lievää harsuuntumista, jonka aiheuttajista männynversosurma on tärkein. Puuston teknisen laadun kannalta vakavinta on puuston lahoisuus ja erilaiset runkovauriot. Lisäksi esiintyi melko runsaasti myös tuhoja, jotka ovat kohdistuneet puiden latvusten ylempiin osiin. Vallitsevien latvuserrosten puissa oli vähiten tuhoja ja ne olivat myös lievimpiä.



Kuva 2. Kuusen (a) ja männyn (b) harsuuntuminen ikäluokittain Etelä-Suomessa 1986-92.

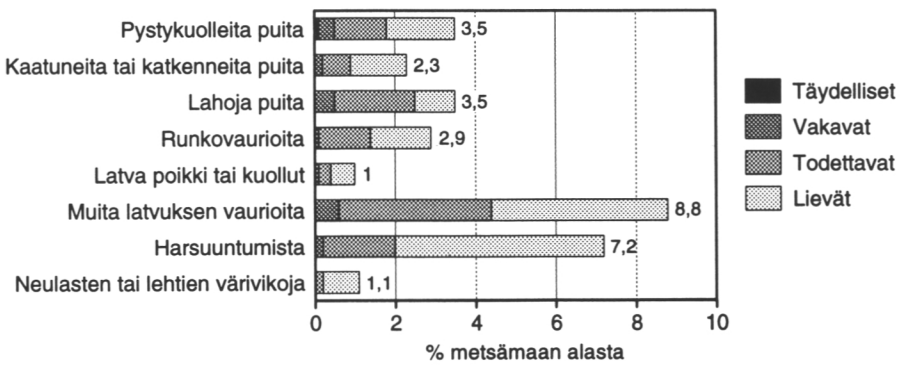
Tuhojen esiintyminen metsikkökuvioilla

Täydellisiä tuhoja esiintyi kaikkiaan noin 30 000 ha:lla (0,3 %). Tästä pinta-alasta 60 % oli alle 20-vuotiaita metsiä. Tärkeimpiä aiheuttajia olivat erilaiset sienitaudit, tuuli ja muut ilmastotekijät sekä hirvet ja myyrät. Vakavia tuhoja oli 1,9 %:lla, muita metsikön laatua alentavia tuhoja 11,2 %:lla sekä lieviä tuhoja lisäksi 16,7 %:lla metsämaan alasta (kuva 3). Tuhoista 65 % oli syntynyt viiden vuoden kuluessa ennen inventointia. Lievistä tuhoista kaksi kolmasosaa oli harsuuntumista, neulasten värimuutoksia tai muita latvuksen tuhoja. Pystykuolleiden puiden osuus lievistä tuhoista oli 10 %. Yleisin tuhon aiheuttaja oli männynversosurma, muita syitä olivat mm. muut sienitaudit, ilmastotekijät ja puiden keskinäinen kilpailu. Metsikön laatua alentavista tuhoista on eniten erilaisia latvuksen tuhoja ja vikoja. Vakavissa tuhoissa esiintyy enemmän puuston lahoisuutta ja pystykuolleita puita kuin lievissä tuhoissa, harsuuntumista ja neulasten värin muutoksia sen sijaan esiintyy vähemmän.

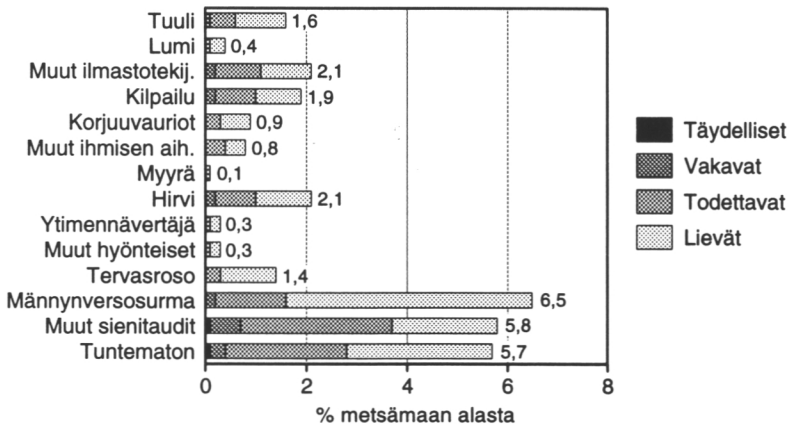


Kuva 3. Tuhojen yleisyys metsämaalla Etelä-Suomessa 1986-92.

Kaikista tuhoista puolet on erilaisia latvuksen tuhoja tai harsuuntumista (kuva 4). Puiden latvatuhot ja muut latvuksen yläosan tuhot ovat usein metsikön laatua alentavia, puiden harsuuntuminen on pääosin arvioitu lieväksi tuhoksi. Pystykuolleita puita esiintyi 3,5 %:lla metsistä, näistä lieviksi arvioiduissa tuhoissa on vain muutama kuollut puu hehtaarilla. Puiden lahoisuus on vakavinta puuston teknisen laadun ja arvon heikentymisen takia. Sienitaudit ovat määrällisesti tärkein tuhojen aiheuttaja (kuva 5). Tavallisimmin lievänä esiintyvää männynversosurmaa on ollut runsaasti, sen määrä on vaihdellut vuosittain ja alueittain voimakkaasti. Muista tuhonaieuttajista mainittakoon hirvi sekä tuuli ja muut ilmastotekijät.



Kuva 4. Tuhojen ilmasut metsämaalla Etelä-Suomessa 1986-92.



Kuva 5. Tuhojen aiheuttajat metsämaalla Etelä-Suomessa 1986-92.

Eniten tuhoja esiintyi taimikoissa ja vanhoissa metsissä, joissa tuhot olivat myös vakavimpia. Vähiten tuhoja oli kasvatusmetsissä. Taimikkoja vaivaavat varsinkin sienitaudit ja vanhoissa metsissä lisääntyä lahoisuus ja iästä johtuva puuston rappeutuminen. Metsikön laatua alentavia tuhoja esiintyi eniten lehtipuuvaltaisissa metsissä. Mäntyvaltaisissa metsissä lieviä tuhoja oli selvästi enemmän kuin kuusivaltaisissa metsissä. Tämä johtuu männynversosurman laajasta esiintymisestä. Viljelytaimikoissa oli enemmän tuhoja kuin luontaisesti syntyneissä taimikoissa. Taimikkotuhoja oli eniten pelloille istutetuissa taimikoissa.

Päätelmät

Valtakunnan metsien inventoinnissa tehtävä tuhoinventointi liittyy osana muun aineiston keruuseen. Tuhojen arviointi näin kattavasti on tehty nyt ensimmäistä kertaa. Aineisto antaa mahdollisuuden monipuoliseen tuhojen tarkasteluun ja tuhojen esiintymisen arviot ovat otoksen koon puolesta varsin luotettavia, inventoinnissa saadaan laaja otos myös alueellisesti. Otos sisältää koko puuston ja yhdessä kuviotietojen kanssa tuhojen merkittävyys saadaan hyvin esille.

Tuhojen tarkastelu tehdään silmävaraisesti ja tarvittaessa kiikaria apuna käyttäen. Näkyvät metsikön laatuun ja kehitykseen vaikuttavat tuhot pyritään havainnoimaan aina, kuten myös lievät tuhot, jos ne ovat havaittavia tai niillä voi olla pientäkin vaikutusta metsikön kehitykseen. Neulasten ja lehtien värimuutokset tai harsuuntuminen voivat jäädä huomioimatta, jos on havaittu vakavampaa tuhoa.

Inventoinnin kiertoaika on pitkä, noin 10 vuotta. Tämän vuoksi vain osasta maata on saatavissa kerrallaan tuoreita tietoja. Epidemioiden seuraamiseen ei ole mahdollisuuksia. Osa niistä voi jäädä havaitsematta tai aiheuttajaa ei enää voida määrittää. Metsien tilan seuranta inventoinnissa tapahtuu pienellä viiveellä, tietoja tuhojen muutoksista saadaan vasta seuraavalla inventointikierröksellä.

Tulokset ovat keskiarvo Etelä-Suomen alueelta vuosilta 1986-92. Metsissä on oireita ilman epäpuhtauksien vaikutuksista, kuten harsuuntumista, neulasten värivikoja ja viherlevää neulasten pinnoilla ja puiden rungoilla (Mikkola ym. 1993). Naavamaisen jäkälien on eri tutkimuksissa todettu selvästi vähentyneen puiden rungoilta ja oksilta Etelä-Suomen alueella. Naavamaisia jäkäliä tavattiin inventoinnin yhteydessä noin 30 %:lla metsämaan alasta ja 43 %:lla niiden metsien pinta-alasta, joilta niiden määrää arvioitiin.

Pääosa esiintyneistä tuhoista on metsiin luonnollisesti kuuluvia tuhoja. Kasvatushakuin ja taimikonhoitotoimenpitein voidaan tuhojen jälkiä korjata ja estää tuhojen syntymistä. Toisaalta vanhoissa metsissä luonnollisesti lisääntyvät tuhot, kuten lahoisuus sekä latvusten viat ja vauriot kuuluvat monimuotoiseen metsäluontoon olennaisena osana. Ilman epäpuhtaudet aiheuttavat oireita osassa puustoa, mutta merkkejä puiden kuolleisuuden lisääntymisestä aikaisempiin inventointeihin verrattuna ei ollut havaittavissa.

Kirjallisuus

- Aarne, M. (toim.). 1993. Metsätalastollinen vuosikirja 1992. SVT Maa- ja metsätalous 1993:5. Metsäntutkimuslaitos 317 s.
- Mikkola, K., Jukola-Sulonen, E.-L. & Kuusinen, M. 1993. Epifyyttijäkälien esiintyminen. Julkaisussa: Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkela, H. & Nieminen, T. (toim.). Metsäluonto ja ilmansaasteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446: 142-146.
- Salminen, S. 1993. Eteläisimmän Suomen metsävarat, 1986-88. Folia Forestalia 825.
- Valtakunnan metsien 8. inventointi. 1991. Maastotyön ohjeet. Metsäntutkimuslaitos. Metsien käytön tutkimusosasto.
- Yli-Kojola, H. 1993. Julkaisussa: Hyvärinen, A., Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkela, H. & Nieminen, T. (toim.). Metsäluonto ja ilmansaasteet. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446: 102-105.

Metsämaiden viljavuus ja happamoituminen

Pekka Tamminen
Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto
PL 18, 01301 Vantaa

Metsämaiden viljavuus

Viljavuudella tarkoitetaan metsänkasvupaikan tai metsämaan hyvyttä puun kasvun kannalta, joten viljavuus on yhtä kuin paikan puuntuotoskyky. Sen mittana on yleisimmin puiden runkotilavuuden kasvu hehtaaria ja vuotta kohti. Koska tilavuuskasvu on hankala määrittää, mitataan viljavuutta myös pituusboniteetilla eli hehtaaria kohti 100 paksuimman puun keskipituudella 100 vuoden iällä. Esimerkiksi puuston tiheys ei juuri vaikuta tähän pituustunnukseen, mutta jos isompia puita on poistettu harvennuksissa, kasvupaikan tuotoskyvystä saadaan aliarvio.

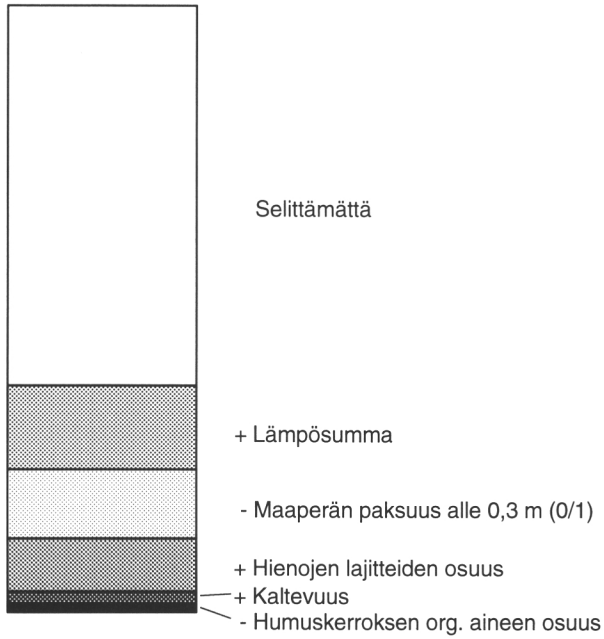
Viljavuuteen vaikuttaa paikalla kasvavan puuston ominaisuuksien (perimä) ja käsittelyn lisäksi ilmasto sekä kasvupaikan vesi- ja ravinnetalous. Ilmasto voidaan Suomen oloissa kuvata tyydyttävästi ns. tehokkaalla lämpösummalla. Puiden vesi- ja ravinnetaloutta ei pystytä mittaamaan suoraan, vaan on turvauduttava epäsuoriin menetelmiin. Pintakasvillisuuteen perustuvat metsätyypit kuvaavat pääasiassa ravinteisuutta, mutta osittain myös vesitaloutta (Kuusipalo 1985). Vesitaloutta voidaan kuvata myös topografian, soistumista osoittavien kasvien, turpeen tai pohjaveden esiintymisen, maan raekoostumuksen ja maanoksen avulla.

Seuraavassa esimerkkejä eri tekijöiden vaikutuksesta kasvupaikan puuntuotoskykyyn vuosina 1980-85 kerättyyn aineistoon perustuen (Tamminen 1994). Etelä-Suomesta mitattiin tällöin 415 mänty- ja 441 kuusinäytealalta mm. tuotoskykyä osoittava pituusboniteetti ja useita kasvupaikka- ja maaperätunnuksia.

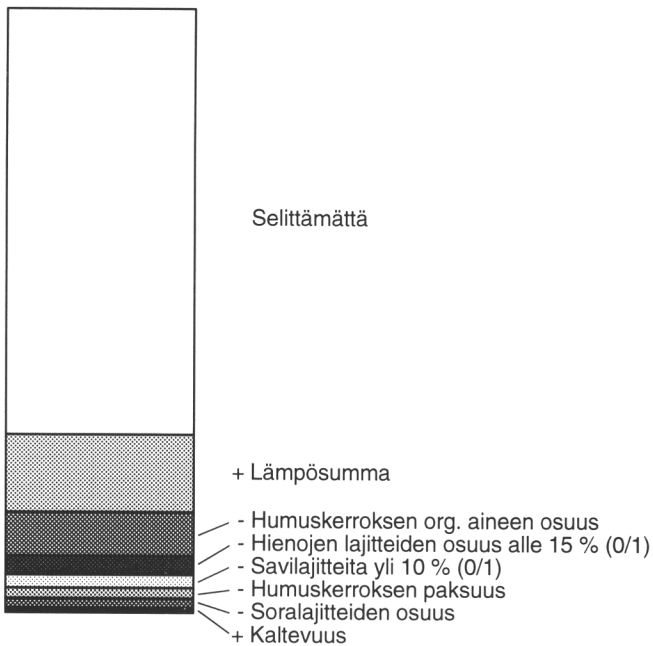
Kasvupaikan ja maaperän fysikaalisista tunnuksista lämpösumma, maaperän paksuus, hienojen lajitteiden osuus, humuskerroksen orgaanisen aineen osuus ja rinteiden kaltevuus selittivät männiköiden tuotoskykyä (kuva 1). Kuusikoiden tuotoskykyä selittivät lämpösumma, rinteiden kaltevuus, soran osuus, alhainen (<15 %) hienojen maalajitteiden ja korkea (>10 %) savilajitteen osuus, humuskerroksen paksuus ja sen orgaanisen aineen pitoisuus (kuva 2).

Kemiallisista eli ravinteisuutta kuvaavista tunnuksista selittivät männiköiden tuotoskykyä parhaiten humuskerroksen orgaanisen aineen typpipitoisuus ja kivennäismaakerroksen 0-30 cm uuttuvan kalsiumin määrä, kg/ha. Kuusikoissa parhaat kemialliset maaperätunnuksukset olivat humuskerroksen ja kivennäismaan orgaanisen aineen typpipitoisuudet. Uuttuvan kaliumin määrä näytti hieman yllättävästi korreloivan negatiivisesti tuotoskyvyn suhteen.

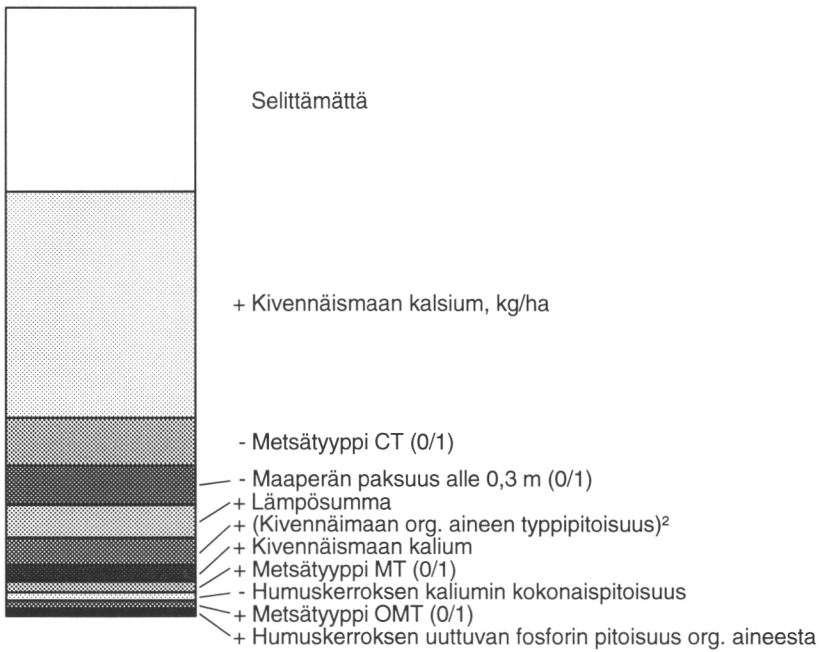
Parhailta tuotoskykyä kuvaavilla malleilla pystyttiin selittämään männiköissä 70 % (kuva 3) ja kuusikoissa 57 % (kuva 4) pituusboniteetin vaihtelusta. Yksinkertaisilla ennustemalleilla, joissa oli mukana lämpösumman lisäksi vain metsätyypimuuttujia, pystyttiin selittämään männiköissä 72 % ja kuusikoissa 56 % parhaiden mallien selittämästä vaihtelusta (vrt. Nieppola 1993).



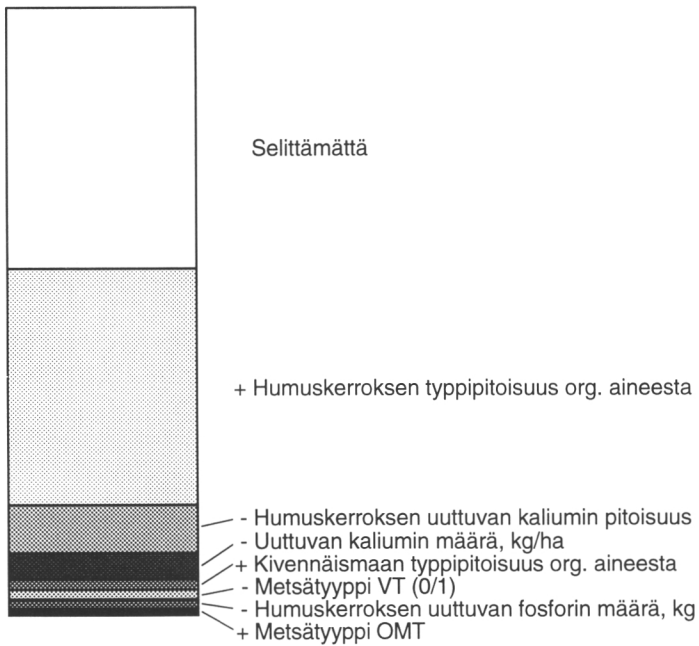
Kuva 1. Fysikaalisten tunnusten suhteellinen merkitys männiköiden tuotoskyvyn kannalta.



Kuva 2. Fysikaalisten tunnusten suhteellinen merkitys kuusikoiden tuotoskyvyn kannalta.



Kuva 3. Kasvupaikkatunnusten suhteellinen merkitys mäntiköiden tuotoskyvyn kannalta.



Kuva 4. Kasvupaikkatunnusten suhteellinen merkitys kuusiköiden tuotoskyvyn kannalta.

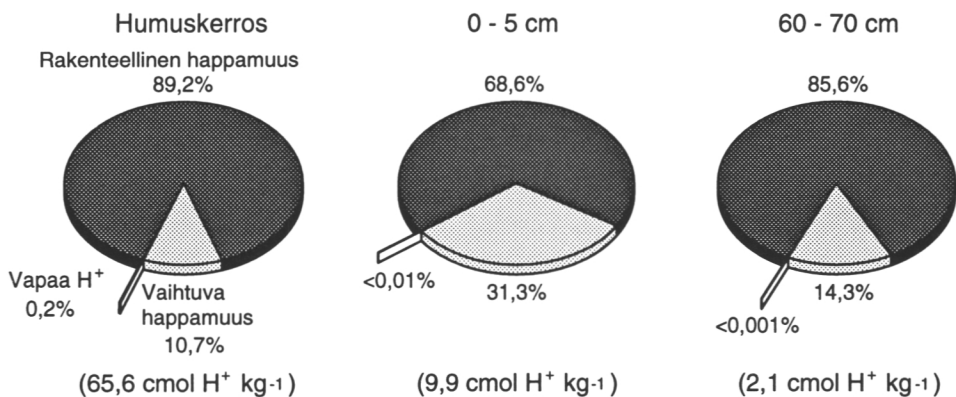
Metsämaiden happamoituminen

Metsämaat ovat happamoituneet luontaisesti siitä asti, kun ne paljastuivat mannerjäätikön ja jääkauden jälkeisten vesien alta, keskimäärin 8 000-10 000 vuotta sitten. Kun maa happamoituu, niin emäksisiä yhdisteitä ja ioneja korvautuu maavedessä ja maahiukkasten pinnalla happamilla yhdisteillä ja ioneilla, ja samalla maan pH laskee. Tosin maan vesilietoksesta mitattu pH ilmentää vain osaa maan happamuudesta, maaveden happamuutta eli vetyoinipitoisuutta. Maan kiinteään ainekseen liittyvä happamuus voi olla vaihtuvaa - ts. maaveden suhteen kemiallisessa tasapainossa olevaa - tai rakenteellista, tiukasti maahiukkasiin sitoutunutta happamuutta. Ne voidaan määrittää uuttamalla maanäyte puskuroimattomalla (esim. KCl) tai puskuroidulla suolaliuoksella (esim. ammoniumasetaatti, pH =7) ja titraamalla maasta uuttoneesteeseen siirtyneet vetyionit emäksellä (esim. NaOH). Neutralointiin kulunut emäksen määrä osoittaa vetyionien eli happamuuden määrän. Vaihtuva happamuus määritetään puskuroimattomalla ja rakenteellinen happamuus puskuroidulla suolaliuoksella. Suomen metsämaissa vaihtuvan happamuuden osuus on 10-30 % ja rakenteellisen happamuuden osuus 70-90 % kokonaishappamuudesta (kuva 5) maakerroksen sijainnin, raakoostumuksen ja humuspitoisuuden mukaan. Ns. vaihtuvan vedyn eli protonien osuus vaihtuvasta happamuudesta on merkittävä yleensä vain humuskerroksessa. Sen sijaan kivennäismaassa vaihtuvan happamuuden määrä vastaa likimain ns. happamien Al^{3+} ja Fe^{3+} -kationien kokonaisuutta. Maahiukkasten rakenteellista happamuutta selittää parhaiten maan orgaanisen aineen osuus. Rakenteellinen happamuus syntyy alumiini- ja rautahydroksidien ja -kompleksien sekä erityisesti orgaanisten happojen puskurireaktioissa, joissa nämä luovuttavat protoneita eli vetyioneja liuokseen.

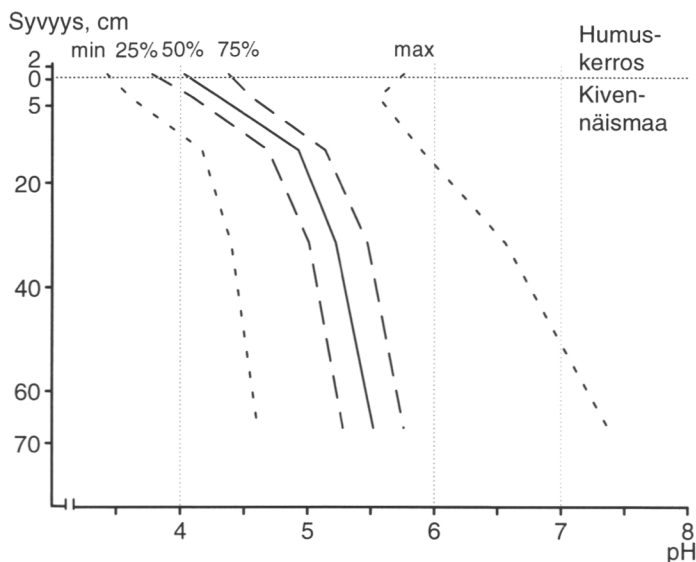
Metsämaan pH alenee hyvin hitaasti, koska maa on hyvin puskuroitunut happamoitumista vastaan. Mitä syvemmästä kerroksesta on kysymys, sitä hitaampia, mutta toisaalta sitä peruuttamattomampia muutokset ovat. Esimerkiksi sateen mukana tuleva happamuus neutraloituu sitä paremmin, mitä paksumpi on humuskerros ja mitä hienompaa on kivennäismaa.

Metsämaiden happamuustilannetta tarkastellaan seuraavassa vuosina 1986-89 kerätyn maanäyteaineiston perusteella (Starr ja Tamminen 1992). Valtakunnan metsien inventoinnin pysyviä kangasmaan näytealoja tutkittiin 384. Näytteitä otettiin humuskerroksesta ja kivennäismaakerroksista 0-5, 5-20, 20-40 ja 60-70 cm.

Vesi-pH vaihteli eri kerroksissa voimakkaasti (kuva 6). Humuskerroksen pH oli alimmillaan 3,4, kivennäismaakerroksen 0-5 cm 3,6 ja 5-20 cm:n syvyydessä 4,2 (kuva 6). Vaikka happamuus sinänsä ei ollut vaarallisella tasolla missään maakerroksessa, tiedetään, että kasveille haitallisen alumiinin määrä lisääntyy voimakkaasti, kun kivennäismaan pH laskee alle 4:n (Derome 1989).

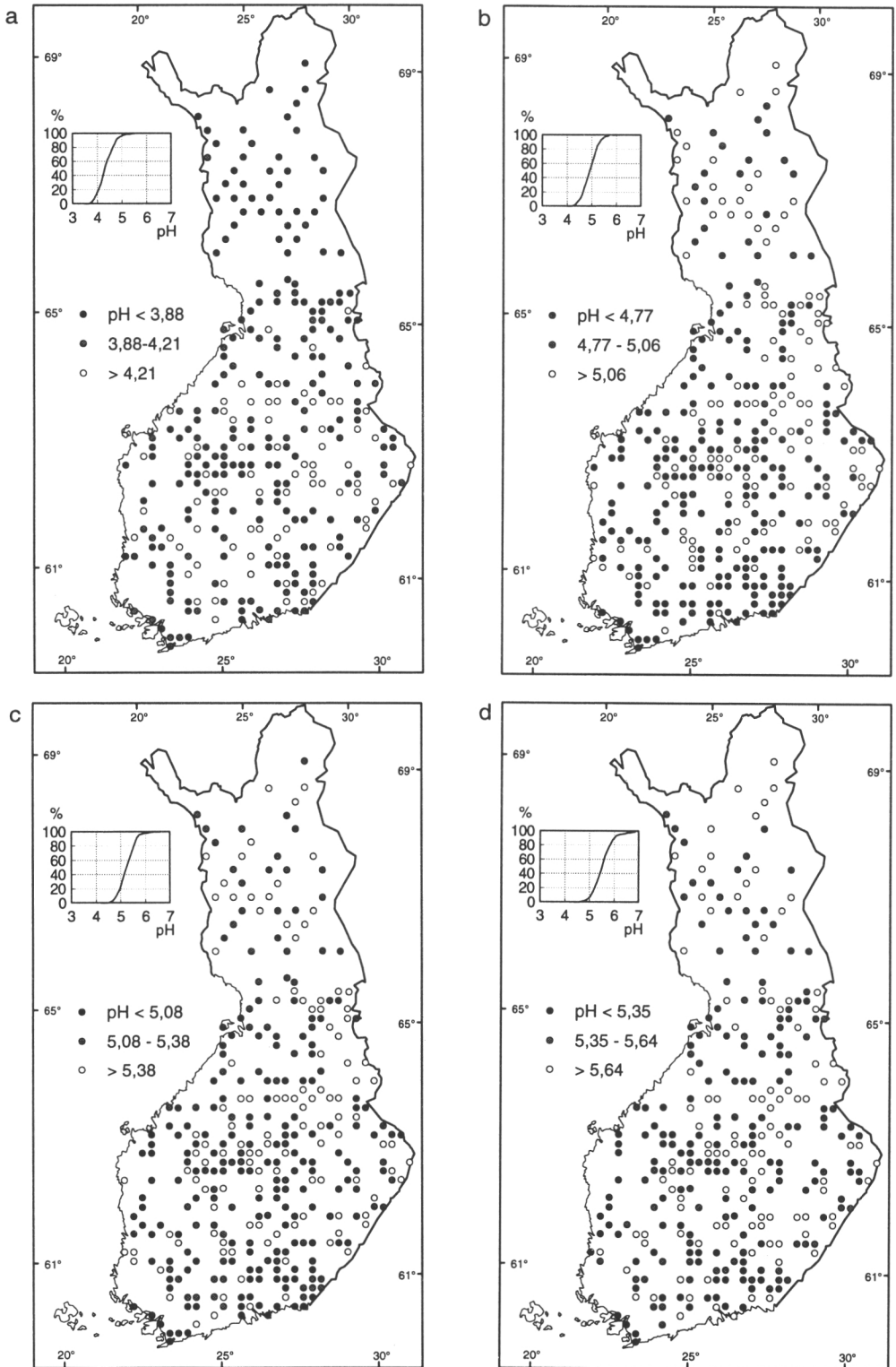


Kuva 5. Vapaan sekä vaihtuvan ja rakenteellisen happamuuden suhteelliset osuudet eri maakerroksissa. Aineistona 65 näytealaa Etelä-Suomessa.



Kuva 6. pH-jakaumat eri maakerroksissa vuosina 1986-89. Aineistona 384 näytealaa. pH mitattu vesilietoksesta.

Aineiston avulla laadittiin maakerroksittain karttoja metsämaan happamuuden mahdollisten alueellisten erojen selvittämiseksi (kuva 7). Humuskerroksen pH oli korkein Etelä- ja Itä-Suomen viljavilla alueilla ja matalin Pohjois- ja Länsi-Suomessa (kuva 7a). Humuskerroksen pH on melko hyvä viljavuuden yleisindikaattori, sillä se kuvastaa mm. kalsiumin ja käyttökelpoisen typen määrää maassa. Kivennäismaan pH korreloi puolestaan yleensä heikosti viljavuuden kanssa. Kivennäismaan pH:n vaihtelu poikkesikin humuskerroksen mallista. Kivennäismaan pH-arvo näytti olevan matalampi Etelä-Suomessa ja rannikoiden nuorilla mailla kuin Pohjois- ja Sisä-Suomessa (kuvat 7b - d). Pienestä havaintojoukosta ei muodostunut kuitenkaan selviä, toisistaan poikkeavia alueita.

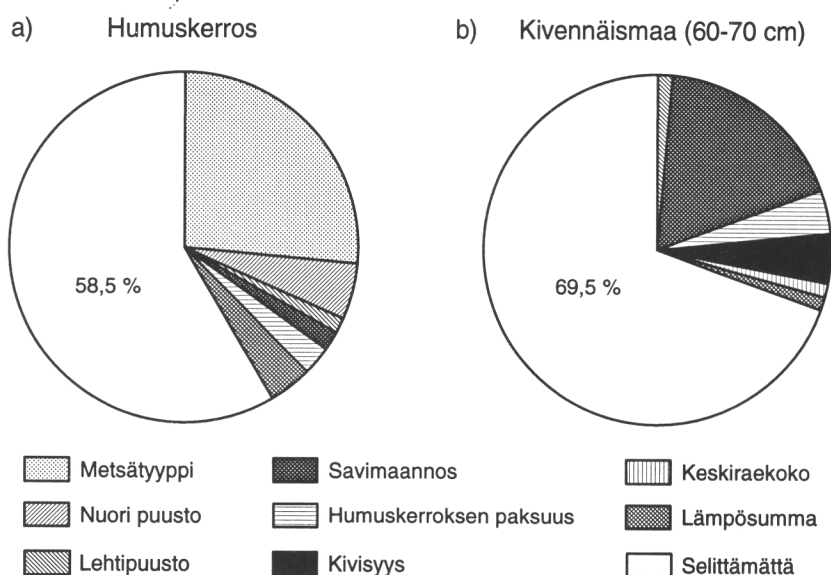


Kuva 7. Humuskerroksen (a) ja kivenniismaakerroksen 5-20 (b), 20-40 (c) sekä 60-70 cm (d) pH.

pH-arvojen ja kasvupaikka- ja maaperätunnusten riippuvuutta tarkasteltiin myös regressioanalyysillä. Tällöin todettiin, että humuskerroksen pH korreloi selvästi parhaiten metsätyyppin kanssa (kuva 8a). Muutkin humuskerroksen pH:n kanssa korreloituneet tunnuksat kuvastavat lähinnä kasvupaikan viljavuutta. pH-arvo on regressiomallin mukaan keskimääräistä korkeampi viljavilla kasvupaikoilla, nuorissa ja lehtipuuvaltaisissa metsissä, hienorakeisilla mailla (savi-hiesu) ja Etelä-Suomessa. Humuskerroksen pH:ta alentavat mm. humuskerroksen paksuus, havupuiden, etenkin kuusen suuri osuus ja puuston ikä.

Kivennäismaakerrosten pH:ta ei pystytty selittämään regressiomalleilla yhtä hyvin kuin humuskerroksen pH:ta. Mallien selityskyky nousi siirryttäessä maan pinnasta syvempiin maakerroksiin. Kivennäismaan pH:ta selittivät paitsi maan raekoostumusta ja vedenjohtokykyä kuvaavat tunnuksat myös humuskerroksen paksuus ja puulajikin (kuva 8b). Sen sijaan humuskerroksen suhteen paras tunnus, metsätyyppi korreloi kivennäismaan pH:n kanssa heikosti ja lämpösomma taas negatiivisesti, ts. etelässä pH oli alempi kuin pohjoisessa. Hienorakeisten maiden korkea pH-arvo on havaittu aiemminkin, mutta lämpösumman pH:ta alentavaa vaikutusta ei ole voitu varmistaa aikaisemista aineistoista.

Kivennäismaan alhaisempaan pH-arvoon Etelä-Suomessa (kuvat 7b - 8) voisi olla synnä esim. Etelä-Suomen metsämaiden olennaisesti suurempi kasvimassan tuotos ja siihen sitoutuvat emäksiset kationit, Etelä-Suomen kivennäismaiden suurempi orgaanisen aineen määrä sekä mahdollisesti lämpimämmästä ilmastosta johtuva emäksisten aineiden pitemmälle edennyt kemiallinen rapautuminen.



Kuva 8. Humuskerroksen (a) ja kivennäismaakerroksen 60-70 cm (b) pH:ta selittävien puusto- ja kasvupaikkatunnusten selitysosuuksat.

Analysoidun aineiston perusteella metsämaiden happamoituminen ei näyttäisi olevan ainaakaan yleisesti metsien pahin uhka tällä hetkellä. Yli 20 vuotta seurattujen lannoituskokeiden perusteella näyttäisi lisäksi siltä, että metsämaiden pintakerrosten nykyisen happamoitumistilan syynä lienevät Suomessa pääasiassa muut tekijät kuin ihmisen aiheuttama hapan laskeuma, vaikka esimerkiksi Etelä-Ruotsissa kivennäismaan on todettu happamoituneen niin voimakkaasti 40 vuodessa, että hapanta laskeumaa on ollut pakko pitää osasyllisenä happamoitumiseen (Hallbäcken ja Tamm 1986).

Kirjallisuus

- Derome, J. 1989. Acid-Induced Aluminum Mobilization in Finnish Mineral Soils. Julkaisussa: Kämäri, J., Brakke, D. F., Jenkins, A., Norton, S. A. & Wright, R. F. (toim.). Regional Acidification Models. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. s. 23-30.
- Hallbäcken, L. & Tamm, C. O. 1986. Changes in soil acidity from 1927 to 1982-1984 in a forest area of south-west Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1: 219-232.
- Kuusipalo, J. 1985. An ecological study of upland forest site classification in southern Finland. Seloste: Ekologinen tutkimus Etelä-Suomen kangasmetsien kasvupaikkaluokituksesta. *Acta Forestalia Fennica* 192. 77 s.
- Nieppola, J. 1993. Understorey plants as indicators of site productivity in *Pinus sylvestris* L. stands. *Scandinavian Journal of Forest Research* 8(1): 49-65.
- Starr, M. & Tamminen, P. 1992. Suomen metsämaiden happamoituminen. Julkaisussa: Kukkonen, I. & Tanskanen, H. (toim.). Ympäristötieteelliset kartat ja kartoitushankkeet Suomessa. Geologian tutkimuskeskus, tutkimusraportti 115: 7-14.
- Tamminen, P. 1994. Pituusboniteetin ennustaminen kasvupaikan ominaisuuksien avulla Etelä-Suomen kangasmetsissä. *Folia Forestalia* 819. 26 s.

Kangasmetsien ravinnetila neulas- analyysien valossa vuosina 1987-1989

Hannu Raitio
Metsäntutkimuslaitos, Parkanon tutkimusasema
Kaironiementie 54, 39700 Parkano

Johdanto

Neulasista ja lehdistä tehtyjen alkuaineanalyysien avulla voidaan arvioida ravinteiden puutos- ja myrkytystiloja sekä tarkkailla puiden ravinnetilaa optimaalisen tuotoksen ja puuaineen laadun saavuttamiseksi. Lisäksi niiden avulla voidaan tutkia ilman epäpuh-
tauksien kuormituksen levinneisyyttä.

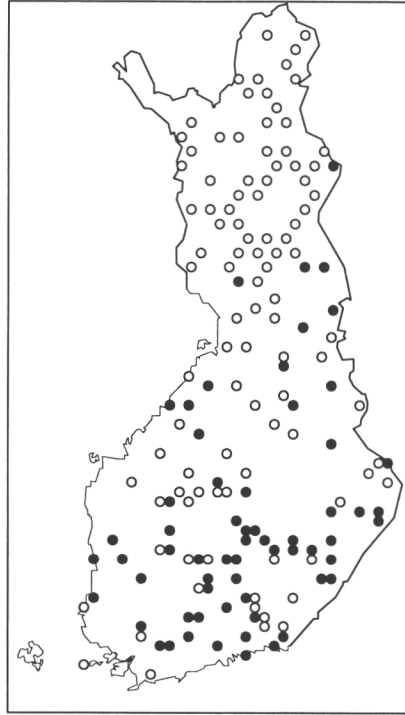
Puiden neulasista ja lehdistä kemiallisia analyysejä alettiin tehdä 1800-luvun lopulla. Neulas- ja lehtianalyysi kehittyi etenkin tämän vuosisadan puolivälin tienoilla (esim. Leyton 1948, Tamm 1955, Wehrmann 1959). Aaltonen (1950, 1955) julkaisi ensimmäisenä suomalaisena tuloksia neulasten ja lehtien ravinnepitoisuuksista kangasmetsissä. Sittemmin ravinneanalyysejä on tehty Suomessa myös turvemailla kasvavien mäntyjen neulasista (mm. Paarlahti ym. 1971, Veijjalainen 1977).

Toinen voimakas kehityskausi neulas- ja lehtianalytiikassa oli ilmansaastetutkimusten yhteydessä parin viime vuosikymmenen aikana. Neulasten kemiallinen koostumus on nykyisin varsin yleisesti käytetty tunnus kartoitettaessa metsien terveydentilaa sekä analysoidessa metsävaurioiden syy/seuraussuhteita (Raitio 1990, Heinsdorf 1993).

Vaikka neulasanalytiikkaa on käytetty laajasti metsien ravinnetilatutkimuksissa, on Suomesta toistaiseksi puuttunut koko maata kattava metsien ravinnetilan peruskartoitus. Tämän työn tavoitteena on kartoittaa männyn ja kuusen neulasten kemiallista koostumusta kangasmetsissä eri puolilla Suomea ja luoda pohja pitkäaikaiselle metsien ravinnetilan seurannalle.

Aineisto ja menetelmät

Aineisto tätä tutkimusta varten kerättiin vuosina 1987-1988 eri puolilta Suomea 98 männiköstä ja 62 kuusikosta (kuva 1). Metsiköt valittiin valtakunnan metsien inventoinnin vuonna 1985 perustamista pysyvistä näytealoista, jotka muodostavat systemaattisen verkon kautta Suomen. Suurin osa männiköistä oli metsätyypiltään tuoreita tai kuivahkoja kankaita sekä kuusikot lehtomaisia tai tuoreita kankaita. Metsiköt edustivat kehitysluokaltaan pääosin varttuneita kasvatusmetsiköitä. Männiköiden keski-ikä oli 94 vuotta ja kuusikoiden 76 vuotta.



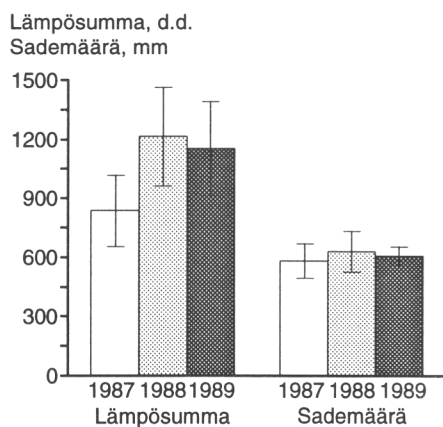
Kuva 1. Mänty- (O) ja kuusinäytealojen (●) sijainti.

Neulasnäytteet kerättiin kunakin vuonna loka- marraskuussa. Kuvassa 2 on esitetty mallin avulla (Ojansuu ja Henttonen 1983) näytealoille lasketut keskimääräiset lämpösummat ja sademäärät vuosina 1987-1989. Kultakin näytealalta kerättiin puukohtaiset näytteet 20:sta valta- tai lisävaltapuusta. Näytteet kerättiin kunakin vuonna samoista puista, etelän puolelta latvuksen ylimmästä kolmanneksesta, sekä nuorimmista (C) että näitä vuotta vanhemmista (C+1) neulasista. Näyteoksat kerättiin pääosin pitkävartisten oksasaksien avulla, mutta ensimmäisenä vuotena osa näyteoksista otettiin ampumalla. Näytteiden keruun yhteydessä kirjattiin ylös puukohtaisesti neulasvuosikertojen lukumäärä.

Näytteistä määritettiin kokonaistyyppi Kjeldahl-menetelmällä (Halonen ym. 1983) sekä typpihappo/vetyperoksidi märkäpoltetuista näytteistä ICP-spektrofotometrisesti P, K, Ca, Mg, S, Fe, Cu, Zn, Mn sekä Al (Huang ja Schulte 1985). Boori määritettiin atsometiini-H värjäyksellä spektrofotometrisesti (Halonen ym. 1983). Tulokset on laskettu kuiva-ainetta kohden (105° C, 24 h).

Vuoden 1987 näytteet analysoitiin sekä puukohtaisesti että näytealakohtaisina kokoomanäytteinä. Vuosien 1988 ja 1989 näytteet analysoitiin ainoastaan näytealakohtaisina kokoomanäytteinä. Kokoomanäyte muodostettiin neulasvuosikerroittain punnitsemalla kustakin puusta yhtä suuri määrä kuivaa neulasjauhetta analysoitavaan näytteeseen.

Aineiston tilastomatematisessa käsittelyssä käytettiin varianssi- ja regressioanalyysijä.



Kuva 2. Mallin avulla näytealoille laskettu keskimääräinen lämpösumma ja sademäärä vuosina 1987-1989 (Ojansuu ja Henttonen 1983).

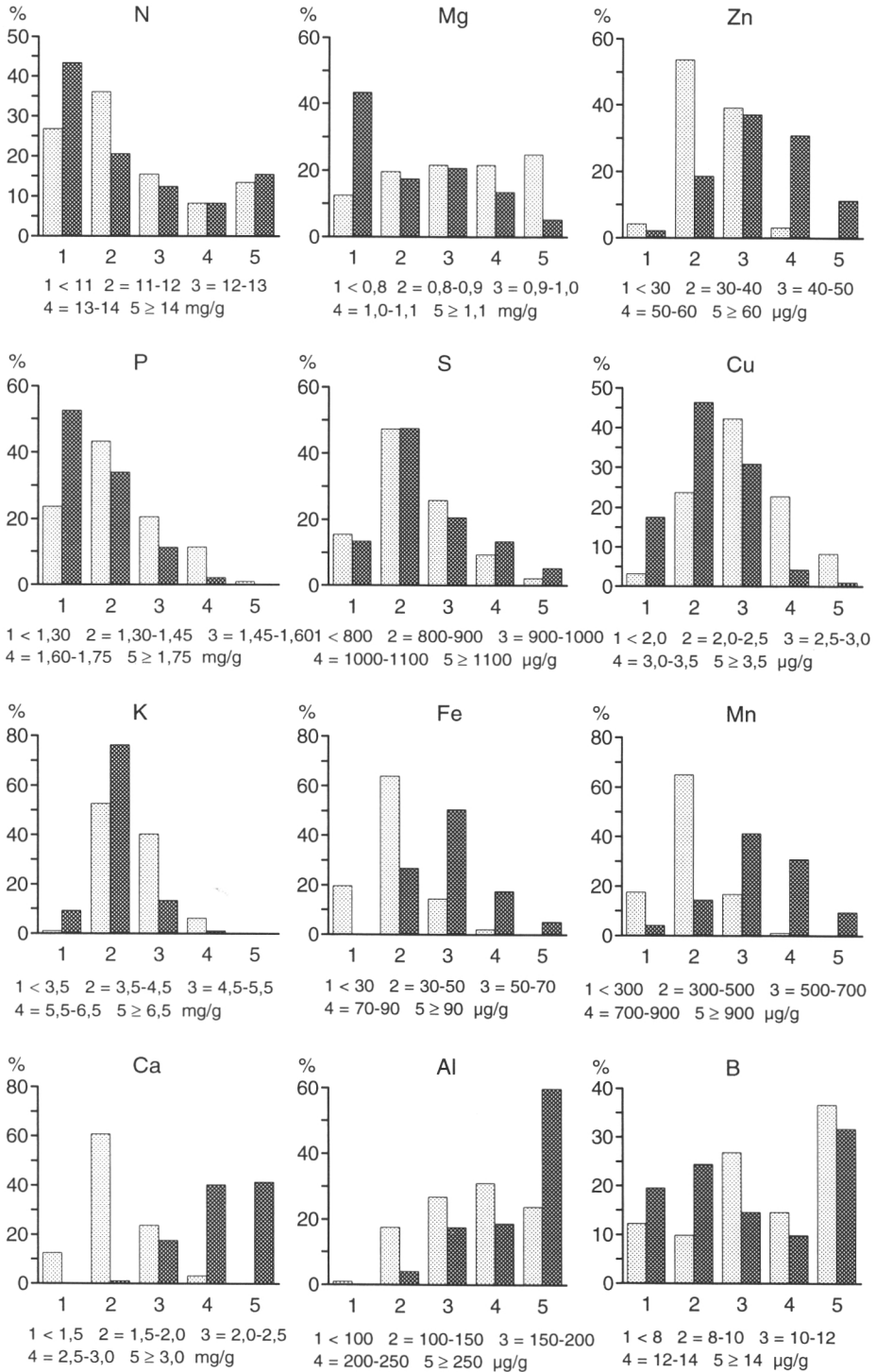
Tulokset ja niiden tarkastelu

Neulasten alkuainepitoisuudet vaihtelevat vuosittain kasvukauden sääoloista riippuen (mm. Evers 1972). Vuosien välinen vaihtelu pitäisikin ottaa huomioon käytettäessä neulasanalyysijä ympäristön tilan kartoituksissa.

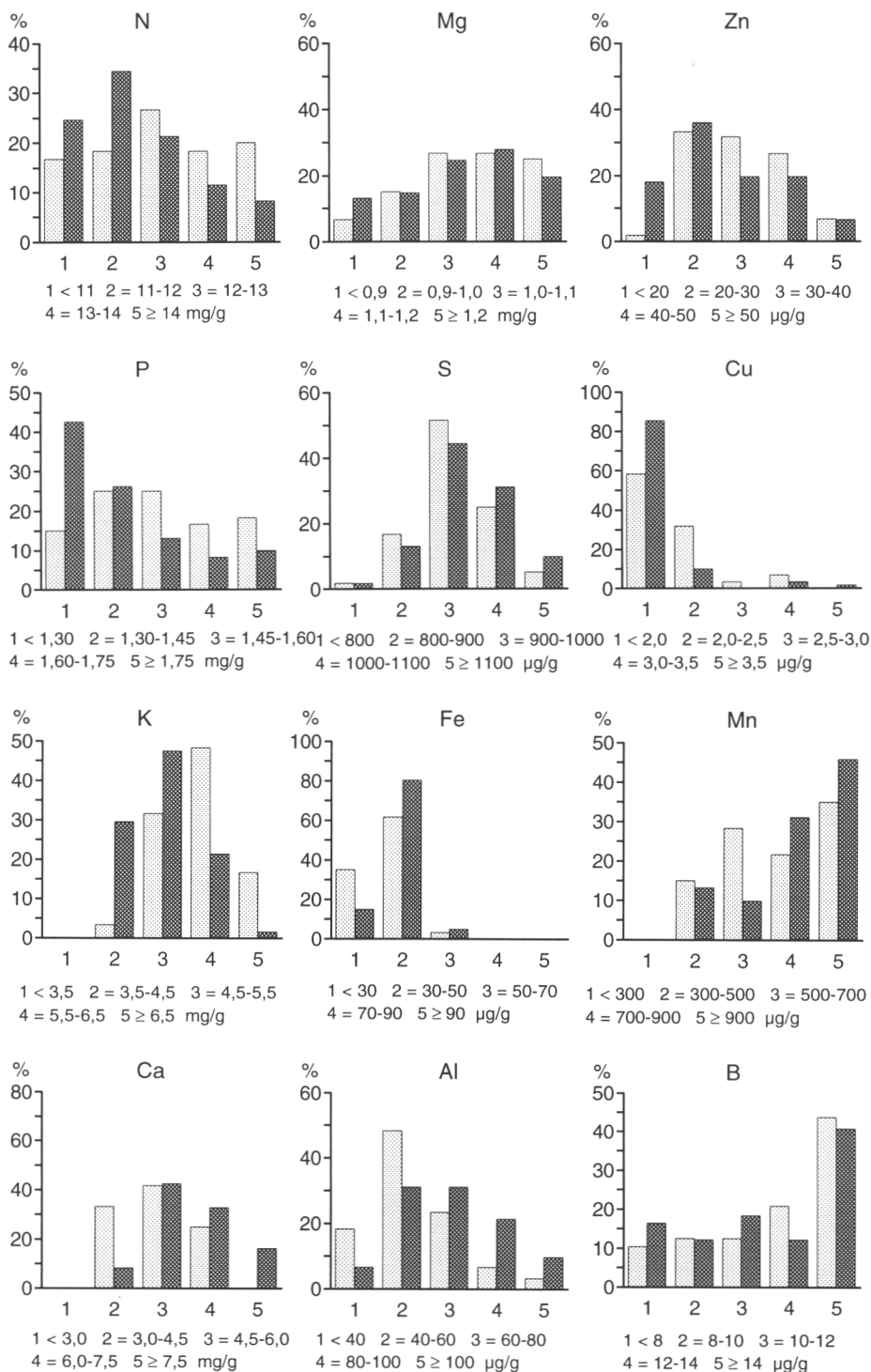
Kuvissa 3 ja 4 on esitetty aineiston ravinnepitoisuuksien frekvenssijakauma vuonna 1989. Aineistosta ilmenee, että männiköistä yli puolella oli typen vajausta ja kuusikoista noin 40 %:lla. Fosforin puutosta ilmeni männiköissä noin 20-30 %:lla ja kuusikoissa hieman enemmän. Kaliumin puutosta ei todettu lainkaan. Boorin puutos oli hieman yleisempi kuusikoissa kuin männiköissä. Boorin puutosta tavattiin 5-10 %:lla näytealoista. Taulukossa 1 on esitetty männyn ja kuusen nuorimpien neulasten alkuainepitoisuuksien keskiarvot, minimi ja maksimit vuosina 1987-1989 kerätystä aineistosta.

Taulukko 1. Männyn ja kuusen nuorimpien neulasten alkuainepitoisuuksien keskiarvot, minimi ja maksimit vuosina 1987-1989 kerätystä aineistosta.

Alkuaine	Mänty			Kuusi		
	x	min	max	x	min	max
N mg/g	12,3	7,4	22,5	12,1	6,2	17,6
P mg/g	1,52	0,98	2,22	1,57	1,01	2,32
K mg/g	4,87	3,42	6,50	5,81	3,49	8,50
Ca mg/g	1,85	1,14	4,24	4,46	1,67	7,38
Mg mg/g	0,99	0,52	1,44	1,14	0,71	1,65
S µg/g	936	661	1418	980	746	1249
Fe µg/g	46,4	24,3	148,1	37,0	20,6	106,6
B µg/g	12,1	3,6	27,6	12,6	3,3	27,7
Cu µg/g	2,59	0,79	5,94	2,01	1,02	3,49
Zn µg/g	40,0	25,5	57,3	32,9	16,0	63,7
Mn µg/g	409	157	767	713	216	1399
Al µg/g	212	77	469	57	15	152



Kuva 3. Mäntynäytealojen osuus (%) eri pitoisuusluokissa vuonna 1989 nuorimpien (C) ja näitä vuotta vanhempien (C+1) neulasten perusteella.

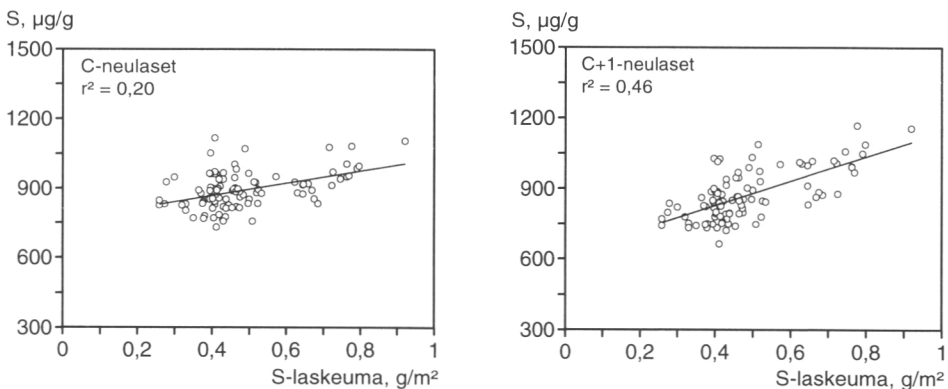


Kuva 4. Kuusinäytealojen osuus (%) eri pitoisuusluokissa vuonna 1989 nuorimpien (C) ja näitä vuotta vanhempien (C+1) neulasten perusteella.

Männyn nuorimpien neulasten kalium-, magnesium-, kupari- ja sinkkipitoisuudet olivat keskimäärin korkeampia Pohjois-Suomessa kuin Etelä-Suomessa. Tämä selittynee osin geologisilla eroilla. Typpi- ja rautapitoisuuksien suhteen tilanne oli puolestaan päinvastainen, ts. korkeimmat pitoisuudet keskittyivät Kokkola - Lappeenranta -linjan eteläpuolelle. Männyn neulasten rikkipitoisuudet olivat korkeimpia Etelä-Suomessa sekä Itä-Lapissa. Neulasten typpi- ja rikkipitoisuuden alueellinen jakauma käy karkeasti yksiin typpi- ja rikkilaskeuman määrästä esitettyjen karttojen kanssa. Muiden analysoitujen alkuaineiden osalta alueellisia eroja ei ilmennyt vuoden 1989 aineistossa. Kuusen osalta vastaavan vertailun tekeminen oli epävarmaa, koska kuusikoiden näytealoja oli ainoastaan Etelä-Suomessa.

Rikki on kasveille välttämätön proteiinien ja entsyymien rakenneosa. Kohonneiden ilman rikkidioksidi- tai maaperän sulfaattipitoisuuksien seurauksena neulasten rikkipitoisuuden on havaittu nousevan (esim. Malcom & Garforth 1977, Evers 1986, Landolt ym. 1989, Manninen ym. 1991). Männyn neulasten rikkipitoisuuden ja HAKOMA-mallin (Johansson ym. 1990) avulla laskettujen näytealakohtaisten rikkilaskeuma-arvojen välillä ilmeni riippuvuus, joka oli C+1-neulasten osalta voimakkaampi kuin nuorimpien neulasten osalta (kuva 5). Kuusen neulasilla vastaavaa riippuvuutta ei ilmennyt. Tulos osoittaa, että yksistään nuorimpien neulasten analysointi ei aina anna parasta mahdollista kuvaa vallitsevasta tilanteesta. Tästä syystä suositellaankin analysoitavaksi erikseen mahdollisimman monta neulasvuosikertaa.

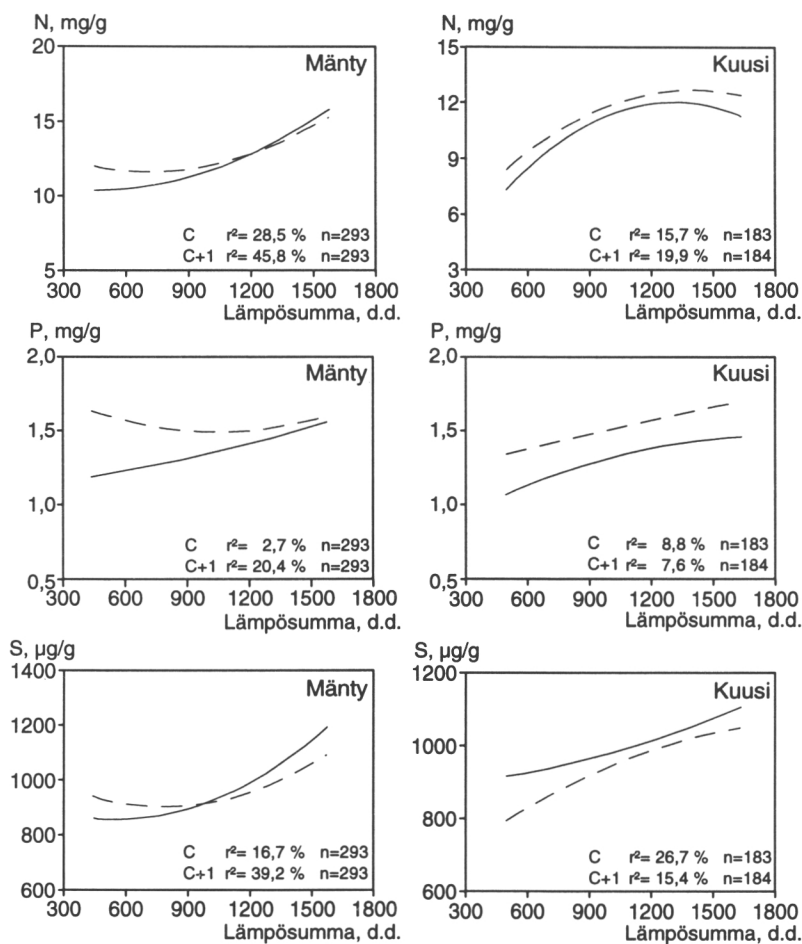
Perinteisesti on tunnettua, että nk. liikkuvien ravinteiden, esim. typen, fosforin, kaliumin, magnesiumin tai rikin, pitoisuudet laskevat neulasten iän myötä. Uusimmissa tutkimuksissa (esim. Cape ym. 1990, Raitio 1992) on kuitenkin havaittu runsaan typpi- ja rikkilaskeuman alueilla, että neulasten typpi- ja rikkipitoisuus lisääntyy neulasten iän kasvaessa. Eteläisimmässä Suomessa, maamme runsaimman typpi- ja rikkilaskeuman alueella, männyn neulasten typpi- ja rikkipitoisuudet olivatkin kaksivuotiaissa neulasissa korkeammat kuin nuorimmissa neulasissa. Sen sijaan Keski- ja Pohjois-Suomessa neulasten typpi- ja rikkipitoisuudet vähenivät neulasten vanhetessa.



Kuva 5. Männyn neulasten rikkipitoisuuden ja HAKOMA-mallin avulla lasketun rikkilaskeuman välinen riippuvuus vuonna 1987.

Männyllä neulasten pituuden, samoin kuin tuhannen neulasen kuivamassan ja mallin avulla (Ojansuu ja Henttonen 1983) lasketun paikallisen lämpösunnan välinen riippuvuus oli voimakkaampi kuin kuusella. Lämpösomma selitti paremmin neulasten pituutta kuin tuhannen neulasen kuivamassaa. Riippuvuudet olivat yleensä voimakkaampia nuorimmilla neulasilla kuin vuotta vanhemmilla neulasilla. Poikkeuksen muodosti kuitenkin kuusen neulasten pituuden ja mallilla lasketun lämpösunnan välinen riippuvuus, joka oli nuorimmilla neulasilla heikompi kuin vuotta vanhemmilla neulasilla. Lämpösunnan ja vuotta vanhempien neulasten liikkuvien ravinteiden pitoisuuksien välinen riippuvuus oli myös voimakkaampi kuin vastaava riippuvuus nuorimmilla neulasilla.

Kuvassa 6 on esitetty neulasten typpi-, rikki- sekä fosforipitoisuuden ja mallin avulla (Ojansuu ja Henttonen 1983) lasketun lämpösunnan välinen riippuvuus sekä kuusella että männyllä. Kuvasta ilmenee, että pitoisuuden ja lämpösunnan välinen riippuvuus on käyräviivainen johtuen siitä, että massaltaan erilaisissa neulasissa voi olla sama ravinnepitoisuus. Tulosten tulkinnessa pitäisikin huomioida kuivamassan vaihtelut.



Kuva 6. Männyn ja kuusen neulasten (---- C, — C+1) typpi-, fosfori- sekä rikkipitoisuuden ja mallin avulla lasketun lämpösunnan (Ojansuu ja Henttonen 1983) välinen riippuvuus.

Yteenveto

Neulasanalyysien mukaan typen ja fosforin puutos oli vuosina 1987-1989 varsin yleistä kangasmetsissä. Hivenravinteista boorin puutos oli yleisintä. Männyn neulasen typpi- ja rikkipitoisuudet kuvastivat paremmin typpi- ja rikkilaskeuman alueellisia eroja kuin kuusen neulasen.

Neulasanalyysi on metsätaloudessa ja ympäristötutkimuksissa paljon käytetty menetelmä. Se on kuitenkin hyvin vaativa menetelmä. Näytteiden keruussa ja tulosten tulkinnessa tulee ottaa huomioon lukuisat vaihtelua aiheuttavat tekijät, kuten tämänkin tutkimuksen tulokset osoittivat.

Kirjallisuus

- Aaltonen, V.T. 1950. Die Blattanalyse als Bonitierungsgrundlage des Waldbodens. Seloste: Lehtianalyysi metsämaan hyvyysluokituksen perusteena. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 37(8): 1-41.
- 1955. Die Blattanalyse als Bonitierungsgrundlage des Waldbodens. II. Selostus: Lehtianalyysi metsämaan hyvyysluokituksen perusteena. II. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 45(2): 1-21.
- Cape, J.N., Freer-Smith, P.H., Paterson, I.S., Parkinson, J.A. & Wolfenden, J. 1990. The nutritional status of *Picea abies* (L.) Karst. across Europe, and implications for 'forest decline'. *Trees* 4: 211-224.
- Evers, F.-H. 1986. Die Blatt- und Nadelanalyse als Instrument der Bioindikation. *Allgemeine Forstzeitschrift* 41: 61-9.
- 1972. Die jahrweisen Fluktuationen der Nährelementkonzentrationen in Fichtennadeln und ihre Bedeutung für die Interpretation nadelanalytischer Befunde. *Allgemeine Forst- und Jagdzeitung* 143: 68-74.
- Halonen, O., Tulkki, H. & Derome, J. 1983. Nutrient analysis methods. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 121: 1-28.
- Heinsdorf, D. 1993. The role of nitrogen in declining Scots pine forests (*Pinus sylvestris*) in the lowland of East Germany. *Water, Air, and Soil Pollution* 69: 21-35.
- Huang, C.-Y.L. & Schulte, E.E. 1985. Digestion of plant tissue for analysis by ICP emission spectroscopy. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 16(9): 943-958.
- Johansson, M., Kämäri, J., Pipatti, R., Savolainen, I., Tuovinen, J.-P. & Tähtinen, M. 1990. Development of an integrated model for the assessment of acidification in Finland. *Julkaisussa: Kauppi, P., Kenttämies, K. Anttila, P. (toim.) Acidification in Finland. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg.s. 1171-1193.*
- Landolt, W., Guecheva, M. & Bucher, J.B. 1989. The spatial distribution of different elements in and relation to atmospheric pollution with sulphur dioxide. *Plant and Soil* 47: 89-102.
- Leyton, L. 1948. Mineral nutrient relationships of forest trees. *Forestry Abstracts* 9(4): 399-408.
- Malcolm, D.C. & Garforth, M.F. 1977. The sulphur:nitrogen ratio of conifer foliage in relation to atmospheric pollution with sulphur dioxide. *Plant and Soil* 47: 89-102.
- Manninen, S., Huttunen, S. & Torvela, H. 1991. Needle and lichen sulphur analyses on two industrial gradients. *Water, Air, and Soil Pollution* 59: 153-163.
- Ojansuu, R. & Henttonen, H. 1983. Kuukauden keskilämpötilan, lämpösumman ja sademäärän paikallisten arvojen johtaminen Ilmatieteen laitoksen mittaustiedoista. *Silva Fennica* 17(2): 143-160.
- Paarlahti, K., Reinikainen, A. & Veijalainen, H. 1971. Nutritional diagnosis of Scots pine stands by needle and peat analysis. Seloste: Maa- ja neulasanalyysi turvemaiden männiköiden ravitsemustilan määrittämisessä. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 74(5): 1-58.

- Raitio, H. 1990. The foliar chemical composition of young pines (*Pinus sylvestris* L.) with or without decline. Julkaisussa: Kauppi, P., Kenttämies, K. & Anttila, P. (toim.) Acidification in Finland. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. s. 699-713.
- 1992. The foliar chemical composition of Scots pines in Finnish Lapland and on the Kola Peninsula. Arctic Centre Publication 4: 226-231.
- Tamm, C.O. 1955. Studies on forest nutrition: I-seasonal variation in the nutrient content of conifer needles. Meddelanden från Statens Skogsforskningsinstitut Stockholm 45(5): 1-34.
- Veijalainen, H. 1977. Use of needle analysis for diagnosing micronutrient deficiencies of Scots pine on drained peatlands. Seloste: Neulasanalyysi männyn mikroravinnetilanteen määrittämisessä turvemailla. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 92(4): 1-32.
- Wehrmann, J. 1959. Methodische Untersuchungen zur Durchführung von Nadelanalysen in Kiefernbeständen. Forstwissenschaftliches Centralblatt 78(5/6): 77-97.

Metsikön ravinnekierto ympäristömuutosten osoittajana

Heljä-Sisko Helmisaari
Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto
PL 18, 01301 Vantaa

Metsien terveydentilan tutkimusohjelman hankkeessa "Ilman epäpuhtauksien vaikutus metsäekosysteemin toimintaan" tutkitaan yhtenä osana ravinnekiertoa eri tavoin kuormiteuissa metsiköissä. Harjavallan ympäristössä ja Hämeenkanalla sijaitsevilla männiköissä on vuodesta 1992 lähtien tutkittu eriasteisen raskasmetalli- ja rikkilaskeuman vaikutuksia metsikön ravinnekiertoon. Kolme tutkimusmännikköä sijaitsee Ilomantsin Mekrijärvellä, jossa 1980-luvun puolivälistä lähtien on tutkittu ravinnekierron eri osavaiheiden vuodenaikaista, vuosien välistä ja metsikön iän mukaista vaihtelua. Normaalin ajallisen ja metsikön iän mukaisen vaihtelun tunteminen on tärkeää tarkasteltaessa ympäristömuutosten vaikutuksia metsikön ravinnekiertoon.

Ympäristömuutokset

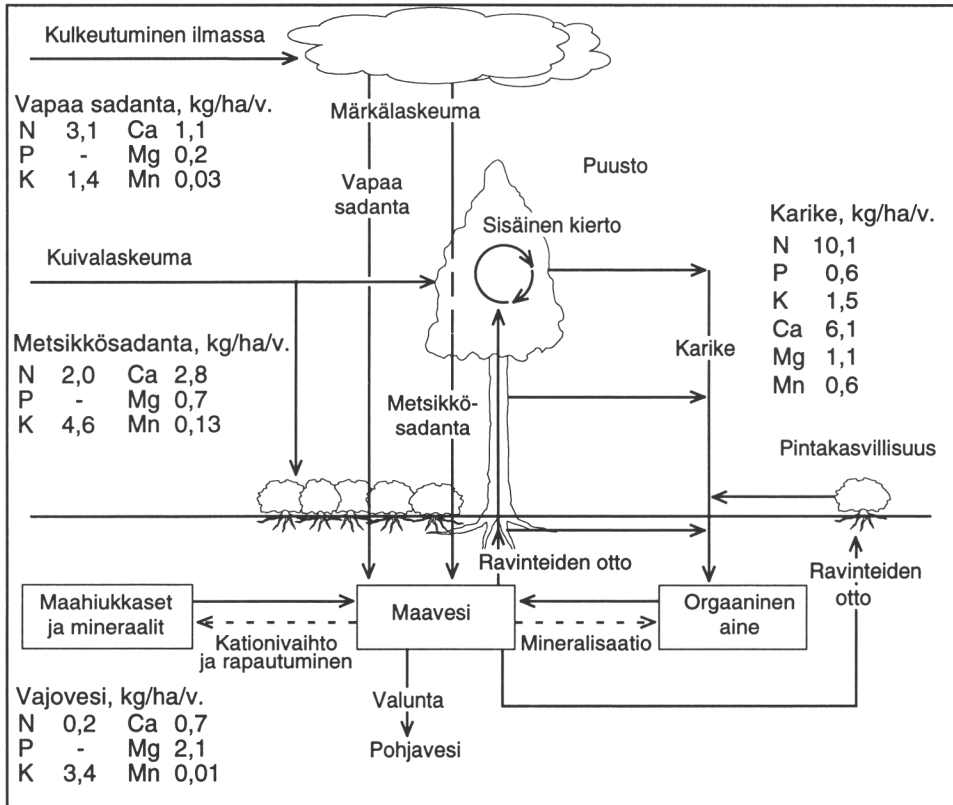
Ympäristömuutoksiin kuuluu sekä luonnostaan tapahtuvia muutoksia että ihmisten toiminnan aikaansaamia muutoksia. Suomessa laajoilla metsäalueilla tärkeimmät ihmisen aiheuttamat ympäristömuutokset ovat typen ja rikin yhdisteiden, nitraatin, ammoniumin ja sulfaatin sekä vetyionien lisääntynyt laskeuma, ilmakehän otsoni- ja hiilidioksidipitoisuuden lisääntyminen ja ilmastonmuutos (Dickinson 1986). Raskasmetalleilla, rikkidioksidilla ja typen oksideilla on merkitystä pääasiassa eräiden teollisuusalueiden ympäristössä.

Ympäristötekijöiden muutokset aiheuttavat vasteita eliökunnassa monilla organisaatiotasolla solusta ekosysteemiin ja koko biosfääriin. Vaste liittyy rakenteen ja/tai toiminnan muutoksiin. Rakenteen muutoksista voidaan mainita esimerkkeinä neulasten ja hienojuurten solurakenne, kasviyksilöiden makrorakenne (pääasiassa hiilihydraattien jakosuhteista johtuva) ja eliöyhteisöjen, esimerkiksi kasvi- tai mikrobisyhteisöjen, lajirakenne. Toiminnan muutoksista voidaan esimerkkeinä mainita solutasolla biokemialliset muutokset, yksilö- ja eliöyhteisötasolla kasvu ja kuoleminen, ja ekosysteemitasolla hiili- ja ravinnedynamiikan muutokset, jotka heijastuvat tuotannossa ja hajotuksessa.

Metsikön ravinnekierto

Metsikön ravinnekierrolla tarkoitetaan ravinnevirtoja metsäekosysteemiin ja siitä pois sekä ravinteiden ajallista ja paikallista jakaumaa ekosysteemissä (kuva 1).

Metsäekosysteemiin eliöiden saataville ravinteita tulee laskeuman mukana, rapautumalla mineraaleista, tyypeä biologisessa typensidonnassa, ja lisäksi ihmisen toiminta tuottaa systeemiin ravinteita esimerkiksi lannoitettaessa. Metsäekosysteemeistä poistuu ravinteita huuhtoutumalla pohjaveteen ja vesistöihin, ja tyypeä myös haihtumalla ilmaan denitrifikaatiossa. Ihmisen toiminta poistaa ravinteita myös puunkorjuun ja keräilytuotteiden välityksellä.



Kuva 1. Metsikön ravinnekierron kaaviokuva. Vapaan sadannan, metsikkösadannan, vajoveden (20 cm:n syvyydeltä kivennäismaasta) ja puiden maanpäällisen karikkeen ravinnemäärät 100-vuotiaassa männikössä Ilomantsissa.

Ravinteet kiertävät metsikössä ns. biologisessa (tai orgaanisessa) kierrossa. Koska metsemme tärkein ravinne, typpi, kulkeutuu pääosin biologisessa kierrossa, joka on metsämaan ravinteisuuden perustekijöitä. Puut käyttävät maavedestä ottamansa ravinteet yhteyttämiseen, hengitykseen, kasvuun tai ne varastoidaan. Osa rakenteeseen sitoutuneista ravinteista vapautuu kasvinosien kuollessa ja kulkeutuu puun sisäisessä ravinnekierrossa takaisin eläviin solukoihin. Osa ravinteista poistuu puusta karikkeeseen mukana. Maahan tulleet ravinteet kasautuvat maaperän orgaaniseen kerrokseen, josta niitä vapautuu vähitellen uudelleen kasvien käyttöön hajotustoiminnan tuloksena.

Metsikön ravinnekiertoa tutkitaan mittaamalla ravinnevirtoja. Ravinteet kulkevat metsikössä kuljetusaineen mukana, joita ovat esimerkiksi vesi ja karike. Ravinteiden jakauma metsikössä määritetään ottamalla näytteitä ekosysteemin eri osista: maaperästä, pintakasvillisuudesta ja puustosta. Päämääränä on laatia metsiköille ravinnetase (ravinnebudjetti). Yksinkertaistettu ravinnetase on ns. tulo-meno (input-output) tase, jossa määritetään metsikköön tulevat ravinnevirrat sekä siitä poistuvat ravinnevirrat yleensä vuoden aika-askeleella. Täydellisissä ravinnetaseissa on määritetty myös biologinen kierto ja siihen liittyvät prosessit.

Mihin ravinnekierrotutkimusta tarvitaan?

Mikäli ravinnekierro tunnetaan paremmin, voidaan kemiallisen kuormituksen muutosten seuraukset puiden kasvulle helpommin ymmärtää ja ennustaa. Metsäekosysteemin toiminnan ymmärtäminen on tärkeää myös seurannan tulosten tulkinnessa.

Metsikön ravinnetaseen avulla voidaan päätellä, kerääntykö ravinteita ekosysteemiin vai poistuuko siitä ravinteita. Ekosysteemin ravinnetaseen tulee olla tasapainossa, jotta ravinnetila pysyisi vakaana. Tasapaino voi muuttua esimerkiksi silloin, jos jotain ainetta keräytyy ekosysteemiin (esimerkiksi tyypeä sateen mukana) tai vastaavasti maasta poistuu huuhtoutumalla enemmän ravinnetta kuin mitä vapautuu kasvien käyttöön.

Ravinnetasetutkimuksen avulla voidaan ennakoida metsissämme mahdollisesti tapahtuvia muutoksia jo ennen kuin nämä muutokset ovat silminnähtäviä - ja pitkällä aikavälillä seurata mahdollisia trendinomaisia muutoksia. Pitkät aikasarjat ovat tärkeitä ilmiöiden normaalivaihtelun tuntemiseksi.

Ravinteiden laskeuma ja valunta

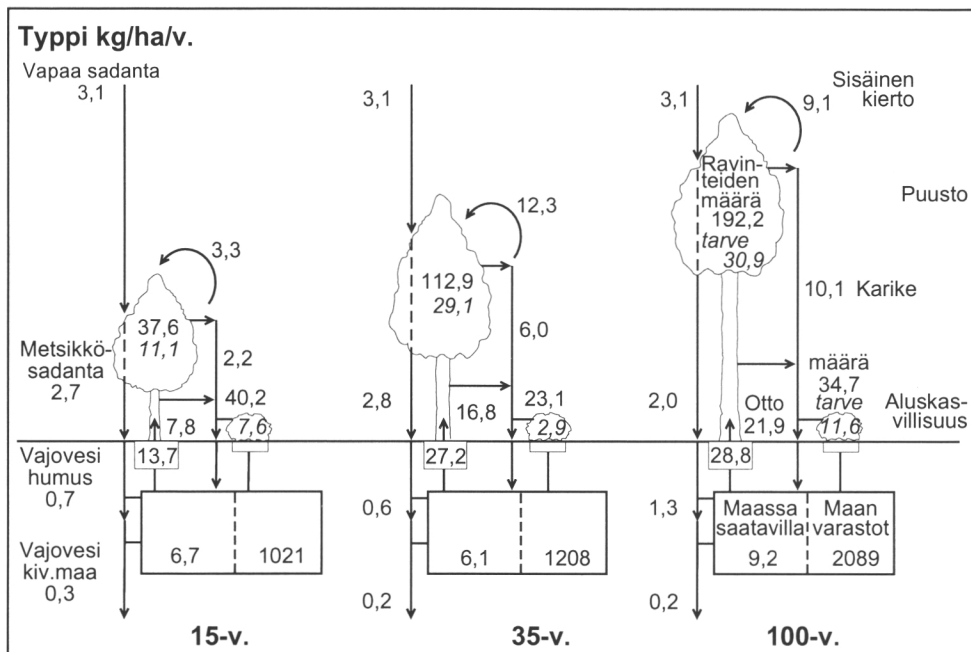
Metsäekosysteemeissä pääosa kalsiumista, kaliumista, magnesiumista ja fosforista tulee kasvien saataville rapautumisessa. Laskeuman mukana näitä aineita tulee vain vähän - esimerkiksi puiden vuosittain sitomasta magnesiumista vain noin kolmisen prosenttia tulee ilmakehästä. Poikkeus on Kaakkois-Suomen eteläosa, jossa laskeuman mukana tulee runsaasti emäsravinteita Viron ja Pietarin teollisuusalueilta.

Tyypeä ja rikkiä tulee metsikköön kasvillisuuden saataville pääasiassa laskeuman mukana sekä biologisen kierron kautta. Tyypilaskeuma vaihtelee muutamasta kilosta hehtaaria kohti vuodessa noin kymmeneen kiloon Kaakkois-Suomessa. Tyypilaskeumalla on lannoittava vaikutus, kasvillisuus käyttää laskeumana tulleen typen heti kasvuunsa.

Vuotuinen typen otto oli noin 22 kg/ha täysi-ikäisessä (100-v.) männikössä Itä-Suomessa (kuva 2). Tästä laskeuman mukana tuli noin seitsemäsosa, kolmisen kiloa. Männyn taimikon (15-v.) vuotuinen typen otto oli noin 8 kg/ha, josta lähes puolet tuli laskeuman mukana. Runsaan tyypilaskeuman alueilla jokin muu ravinne kuin tyyppi voi muodostua minimitekiäjäksi.

Tyypilaskeumasta pääosa tulee kuitenkin talvella lumen mukana, ja Suomessakin nitraattityypeä ja muita ravinteita saattaa huuhtoutua pohjavesiin ja vesistöihin lumen sulassa, koska tällöin kasvien ravinteiden otto on vähäistä.

Sadevesi myös huuhtoo jo latvustosta ravinteita. Runsaammin latvustosta huuhtoutuu mangaania ja emäskationeja (kaliumia, kalsiumia ja magnesiumia), joiden määrät metsikösadannassa ovat moninkertaisia vapaaseen sadantaan verrattuna. Kaliumia huuhtoutuu eniten, koska se on hyvin helppoliukoinen, ja sitä on runsaasti lehden pinnan lähellä olevissa soluissa. Kalium on ainoa ravinne, jota palautuu maahan latvustosta huuhtoutumalla määrällisesti enemmän kuin karikkeen mukana (kuva 1).



Kuva 2. Typen kierto kolmessa eri ikävaiheen männikössä Ilomantsissa. Typen määrät puustossa, pintakasvillisuudessa ja maassa humuskerroksessa ja 30 cm:n kivennäismaakerroksessa kasvien käytettävissä olevat typpimäärät sekä kokonaistyppivarastot samassa maakerroksessa. Typhen virrat vapaassa sadannassa, metsikkösadannassa ja vajovedessä. (Vajovesi kerätty humuskerroksesta ja 20 cm:n syvyydeltä kivennäismaasta). Typhen otto, palautuminen sisäisessä kierrossa ja karikkeessa sekä tarve puuston ja pintakasvillisuuden vuotuisen biomassatuotokseen.

Ravinnekiertotutkimuksissa voidaan määrittää ns. suhteellinen huuhtoutuvuus (Pastor ja Bockheim 1984) eri ravinteille vertaamalla ravinteiden tuloa metsämaahan metsikkösadannassa ja karikkeesta ja huuhtoutumista metsämaasta. Tulosten mukaan magnesium ja kalium ovat herkimmin maaperästä huuhtoutuvia ravinteita (taulukko 1).

Taulukko 1. Ravinteiden suhteellinen huuhtoutuvuus (mitattu huuhtoutuminen maaperästä / tulo maahan karikkeesta ja metsikkösadannassa) kahdessa männikössä Ilomantsissa (Helmisaari 1994).

	Taimikko 15 v.	Täysi-ikäinen 100 v.
Mg	0,68	1,16
SO ₄ -S	0,21	0,66
K	0,62	0,56
N	0,06	0,08
Ca	0,17	0,08
Mn	0,01	0,01
Zn	0,16	0,11

Laskeuman mukana tullut sulfaattirikki ei anionina sitoudu hyvin maa-ainekseen, vaan sitä kulkeutuu runsaasti maannoksen läpi. Sulfaatin haitallisiin ominaisuuksiin kuuluu sen helppo liikkuvuus maassa, ja kyky viedä mukanaan varaukseltaan vastaava määrä emäsravinteita, esimerkiksi juuri magnesiumiumia ja kaliumia (Hallbäckén 1992).

Olemme siis siinä tilanteessa, että metsiin kasautuu tyyppiä, kun taas magnesiumiumia ja kaliumia saattaa poistua maasta eräillä alueilla enemmän kuin tulee laskeuman mukana. Tästä saattaa aikaa myöten aiheutua ravinne-epätasapainoa.

Ravinteiden kierto

Biologiseen kiertoon kuuluu ravinteiden otto maasta ja ravinteiden palautuminen kasvien saataville ns. sisäisessä kierrossa ja karikkeen hajotuksessa. Ravinnetaseiden laadinnassa on usein ongelmana kasvien ravinteiden oton määrällinen arviointi, koska suoria mittauksia kentällä ei voi suorittaa. Ravinteiden otto maasta voidaan kuitenkin määrittää epäsuorasti vähentämällä vuotuisen biomassatuotoksen käyttämästä ravinneäärästä (ravinteiden tarve) sisäisessä kierrossa uuteen biomassaan siirtyvä ravinneäärä. Sisäisessä kierrossa siirtyvä ravinneäärä määritetään vertaamalla kellastuvien neulasten ravinteiden määriä ennen ja jälkeen kellastumisen.

Sisäinen kierto on kaksivaiheinen (Helmisaari 1990):

- 1) Syksyllä liikkuvia ravinteita (N, P, K, Mg) palautuu kellastuvista neulasista varastoitavaksi vihreisiin neulasiin ja sisäkuoreen talveksi. Neulasten kellastuessa solurakenne rikkoutuu ja makromolekyylit (esim. valkuaisaineet) hajoavat pienemmiksi molekyyleiksi, jotka kulkeutuvat helposti. Havupuiden vanhimpien neulasten syksyisen kellastumisen aikana 60-90 % niiden sisältämästä tyypestä, fosforista ja kaliumista kulkeutuu nuorempiin neulasiin.
- 2) Keväällä kasvavien osien ravinteiden tarve käynnistää ravinteiden kuljetuksen talvivarastoista kasvaviin osiin, kuten uusiin versoihin ja neulasiin. Ravinteet kulkeutuvat lähimpään aktiiviseen kasvupisteeseen.

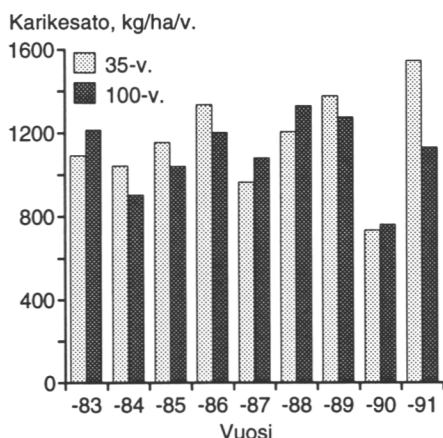
Männikössä sisäinen kierto voi tyydyttää jopa 60 % typen, 45 % fosforin, 35 % kaliumin ja 25 % magnesiumin tarpeesta (Helmisaari 1992). Muun osan tarvitsemistaan ravinteista kasvit saavat maasta ravinteiden oton kautta.

Tietämystä sisäisen kierron toiminnasta voidaan käyttää mm. hetkellisten kertamittausten, esimerkiksi neulasten ravinnepitoisuuksien, tulosten tulkintaan. Neulasten liikkuvien ravinteiden vuodenaikaisvaihtelua voidaan selittää sisäisen kierron avulla.

Maanpäällinen biomassatuotos oli 181, 211 ja 191 g kuiva-ainetta otettua ja sisäisessä kierrossa siirtynyttä tyypigrammaa kohti taimikossa, nuoressa kasvatusmetsikössä ja täysi-ikäisessä männikössä Ilomantsissa. Nämä ns. typen käytön tehokkuudet olivat aluskasvillisuudessa 169, 107 ja 51 g kuiva-ainetta/g tyyppiä (Helmisaari 1994). Pintakasvillisuus oli näin puita tehokkaampi typen käyttäjä. Taimikossa pintakasvillisuus käyttää jopa 40 % maanpäällisen biomassatuotoksen käyttämästä tyypestä (kuva 2).

Neulasmassan vuosivaihtelut

Ravinnekiertotutkimuksissa pitkät aikasarjat ovat oleellisia, jotta tunnettaisiin vuosien välinen normaali vaihtelu. Esimerkiksi karikesadon määrä vaihtelee huomattavasti vuosittain. Ilomantsin tutkimusmänniköissä oli vuonna 1990 pieni neulaskarikesato (kuva 3). Neulasten valtaosa putoaa näissä metsiköissä neljäntenä kasvukautena neulasten muodostumisesta. Vuonna 1990 kellastuneista neulasista valtaosa oli muodostunut vuonna 1987, jolloin oli kylmä kesä. Kasvukauden lämpötila vaikuttaa eniten muodostuvan neulasmassan määrään. Näinollen neulaskarikesadon vuosivaihtelut riippuvat mm. neulasten muodostumiskesien säätilasta.



Kuva 3. Vuotuinen neulaskarikesato kahdessa eri ikävaiheen männikössä Ilomantsissa.

Tästä voidaankin päätellä, kuinka neulasten enneaikainen kellastuminen riippuu usein säätekijöiden luonnollisesta vaihtelusta. Ravinnepuutteessa puu voi kellastuttaa ja pudottaa osan vanhempia neulasiaan ennen aikojaan, jolloin niiden sisältämät liikkuvat ravinteet ovat käytettävissä. Enneaikainen kellastuminen liittyy siis ravinnepuutteeseen, mutta ravinnepuutteen syyt voivat olla täysin luonnollisia sään ja neulasmassan vaihteluihin liittyviä, tai ravinnepuutteen aiheuttajana voivat olla esimerkiksi ilman epäpuhtaudet.

Oletetaan, että ensimmäisenä tarkasteltavana vuonna oli epäedullinen, kylmä kasvukausi ja muodostuva neulasikäluokka oli pieni. Tämä pieni neulasikäluokka kellastuu neljäntenä vuonna, jolloin tulee siis vähän kariketta ja vastaavasti sisäisessä ravinnekierrossa palautuu puun varastoihin vain vähän liikkuvia ravinteita. Jos seuraava kasvukausi, vuosi 5, on taas lämmin, muodostuu suuri neulasikäluokka, joka vaatii kasvuunsa runsaasti ravinteita. Puun sisäiset varastot edellisen syksyn neulasten kellastumisesta ovat pienet, joten maasta täytyy saada lisää ravinteita. Ellei ravinteita ole tarpeeksi tarjolla, strategiana voi olla vanhempien neulasikäluokkien enneaikainen kellastuminen. Tällainen vanhojen neulasten poisto liittyy puun energiataseen ylläpitämiseen ja on siten luonnollinen ilmiö. Jos taas neulaskato aiheutuu jatkuvasta stressistä, esimerkiksi ilman epäpuhtauksista, neulasvuosikertojen määrä voi pysyvästikin alentua.

Tämä esimerkki osoitti sen, että metsäluonnossa tapahtuvat ilmiöt, kuten harsuuntuminen, ovat hyvin usein normaalia vuosivaihtelua. Normaalin vaihtelun tunteminen on tärkeää, jotta pystyttäisiin tunnistamaan ilmiöiden aiheuttajat.

Karrike ja sen hajotus

Karrikeaikasarjoja tutkimalla voidaan tarkastella esimerkiksi neulasmassan ja siemensadon vuotuista vaihtelua. Suurin osa karikkeesta on neulaskariketta. Hyvien käpyvuosien jälkeen saadaan runsaasti käpykariketta (kuva 4).

Karikkeen ravinnepitoisuuksien aikasarjat kuvastavat hyvin muutoksia niissä ravinteissa, jotka eivät liiku puussa, esim. raskasmetalleissa. Sen sijaan liikkuvia ravinteita (N, P, K) karrikeaikasarjojen avulla tarkasteltaessa täytyy muistaa, että karikeneulasissa on jäljellä vain pieni osa elävän neulasen alun perin sisältämästä ravinnemäärästä.

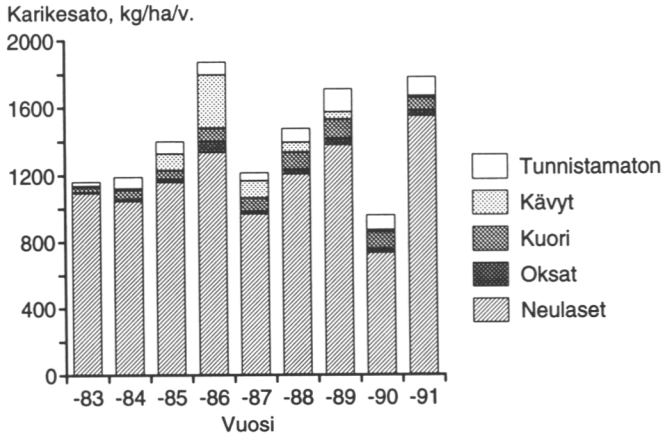
Kivennäismaan orgaaninen aine on pääasiassa peräisin hienojuurikarikkeesta, ja humuksenkin muodostumisessa hienojuurikarikkeella on tärkeä merkitys. Hienojuurikarikkeen tuotanto ylittää tulostemme mukaan ajoittain puuston maanpäällisen osan karikesadon.

Vaikka puuston karikkeessa palautuu vuosittain noin 2-10 kg/ha typpeä, niin vain pieni osa humuksen orgaanisista typpivaroista voi mineralisoitua yhden kasvukauden kuluessa. Maan typpivaroista vain alle prosentti on yleensä mineralisoitunutta ja kasveille käyttökelpoista (kuva 2).

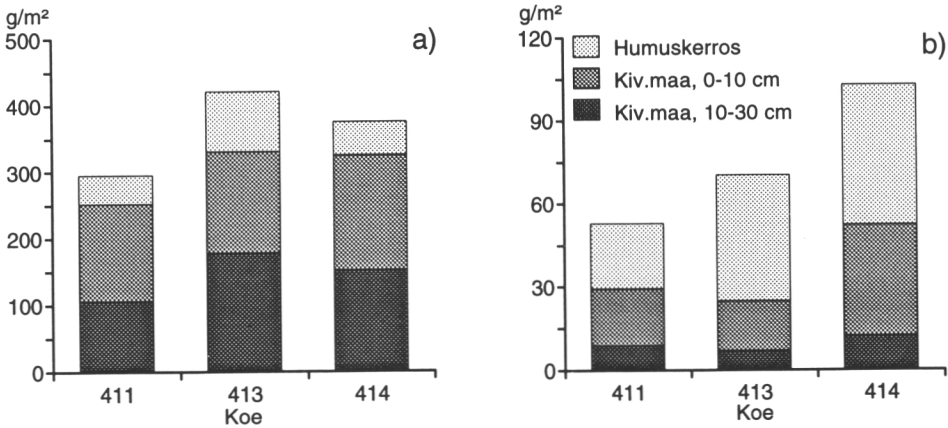
Karikkeen hajotuksesta huolehtivat metsämaassa mikrobit, sienet ja bakteerit. Näiden eliöryhmien reaktioita ympäristömuutoksille ei vielä tunneta riittävän hyvin. Mikäli hajottajaeliöstön toiminta jostain syystä häiriintyy, siitä on vakavia seurauksia koko ekosysteemille. Tästä esimerkki on Harjavallasta, jossa 1940-luvulta viime vuosiin saakka on maahan kohdistunut voimakas raskasmetallilaskeuma. Kuparisulaton läheisissä metsissä hajotusprosessi on lähes pysähdyksissä, minkä seurauksena metsämaahan kasautuu paljon hajoamatonta kariketta. Myös juuriston toiminta on estynyt raskasmetallilaskeuman vuoksi. Puut elävät kituuttaen, pintakasvillisuus on lähes kokonaan kuollut. Eräät pintakasvillisuuden lajit, kuten variksenmarja ja juolukka, kestävät raskasmetalleja, kun taas monet lajit ovat kokonaan hävinneet. Tämä ekosysteemi vastaa pienessä mittakaavassa Kuolan vaurioalueita. Kauempana tehtaista sijaitsevat tutkimusmetsiköt näyttävät päällisin puolin normaaleilta, mutta niissäkin ravinnekierto on häiriintynyt.

Hienojuuret mykorrhitsoineen ovat puiden ravinteiden otossa keskeisiä ja täten ekosysteemin ravinnekierrossa tärkeitä tutkimuskohteita. Harjavallan ympäristön tutkimusmetsiköissä hienojuurten biomassat ovat selvästi pienempiä varsinkin lähinnä tehdasta sijaitsevan metsikön humuskerroksessa (kuva 5). Harjavallassa tutkitaan myös juurten kasvudynamiikkaa.

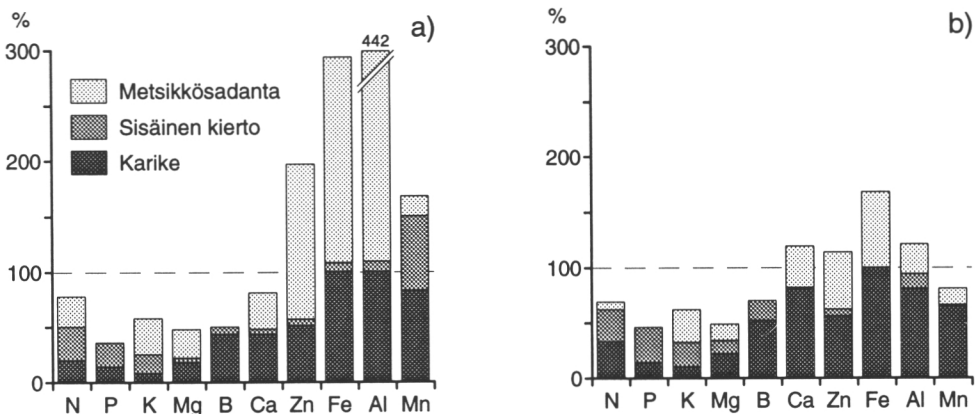
Ravinnekierron prosessien merkitys puiden ravinnetarpeen tyydyttämisessä vaihtelee metsikön iän mukaan. Nuori puusto on herkin maaperän ravinteiden saatavuuden muutoksille (P, Mg, K), koska sisäisessä kierrossa ja karikkeessa palautuu vähemmän ravinteita kuin vanhemmissa metsiköissä (kuva 6). Typpilaskeumalla on ilmeisen suuri merkitys nuoren metsikön typpitarpeen tyydyttämisessä.



Kuva 4. Vuotuinen karikesato 100-vuotiaassa männikössä Ilomantsissa.



Kuva 5. Männyn (a) ja pintakasvillisuuden (b) hienojuurten (läpimitta alle 2 mm) biomassat Harjavallo ympäristön tutkimusmetsiköissä. Koe 411: 0,5 km, 413: 4 km, ja 414: 8 km päästölähteestä.



Kuva 6. Ravinnekierron prosessien (ravinteiden tulo metsämaahan metsikkösadannassa ja karikkeessa sekä palautuminen sisäisessä kierrossa) merkitys taimikon (a) ja täysi-ikäisen männikön (b) ravinnetarpeen tyydyttämisessä. Erotus pylväistä sataan prosenttiin on se osuus vuotuisesta ravinnetarpeesta, joka on ainakin saatava maan varastoista (Helmissaari 1994).

Magnesium ja kalium ovat ravinteita, joiden palautuminen biologisessa kierrossa on vähäisintä puiden tarpeeseen nähden. Näiden ravinteiden tarpeen tyydyttämisessä kriittinen prosessi on mineraalien rapautuminen. Mikäli maasta poistuu magnesiumia ja kaliumia (kuva 1), olisi tärkeää tietää näiden ravinteiden varastojen riittävyys mineraaleissa ja rapautumisnopeus. Hivenravinteiden saatavuus ei kangasmaillamme yleensä ole ongelma booria lukuunottamatta (kuva 6).

Lopuksi

Metsäekosysteemi ravinnekiertoineen on kokonaisuus, jonka toiminta on tunnettava, kun halutaan hoitaa ja käyttää metsiä kestävästi. Toiminnan tunteminen on tärkeää myös metsissä tapahtuvien ilmiöiden normaalivaihtelun ja häiriöiden erottamiseksi.

Kirjallisuus

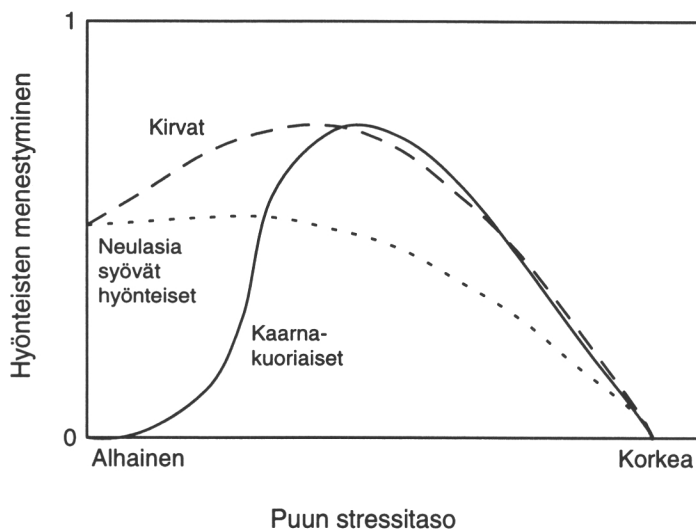
- Dickinson, R. E. 1986. Impact of human activities on climate-framework. Julkaisussa: Clark, W. C. & Munn, R. E. (toim.) Sustainable development of the biosphere. IIASA, Laxenburg.
- Hallbäck, L. & Tamm, C. O. 1986. Changes in soil acidity from 1927 to 1982-1984 in a forest area of south-west Sweden. *Scandinavian Journal of Forest Research* 1: 219-232.
- Helmisaari, H-S. 1990. Ravinnekierto metsäekosysteemissä. Julkaisussa: Kangasmaiden ominaisuudet ja hoito. Maantutkimuspäivä Kouvolassa 1.3.1990. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 370: 18-37.
- 1992. Nutrient retranslocation in three *Pinus sylvestris* stands. *Forest Ecology and Management* 51: 347-367.
- 1994. Nutrient cycling in *Pinus sylvestris* stands in eastern Finland. *Plant and Soil* (hyväksytty julkaistavaksi).
- Pastor, J. & Bockheim, J. G. 1984. Distribution and cycling of nutrients in an aspen-mixed hardwood-spodosol ecosystem in northern Wisconsin. *Ecology* 65(2): 339-353.

Metsäpuiden tuholaisresistenssi

Maarit Kytö, Pekka Niemelä ja Erkki Annila
Metsäntutkimuslaitos, Metsäekologian tutkimusosasto
PL 18, 01301 Vantaa

Puiden elinvoimaisuus ja tuholaisresistenssi

Puiden elinvoimaisuudessa tapahtuvat muutokset vaikuttavat peruselintoimintojen ja kasvun ohella myös puun vastustuskykyyn tuholaisia ja tauteja vastaan. Puu voi altistua hyönteistuholle ympäristön aiheuttaman stressin seurauksena. Tällaisia stressitekijöitä voivat olla esimerkiksi kuivuus tai ilmansaasteiden aiheuttama neulaskato. Eri hyönteisryhmien menestyminen perustuu erilaisiin tekijöihin, joten eri ryhmät reagoivat eri tavoin puun stressiin (Larsson 1989). Esimerkiksi kaarnakuoriaiset näyttävät hyötyvän puiden stressaantumisesta, ja ne harvoin tappavat terveitä, elinvoimaisia puuta. Monet neulasia tai lehtiä syövät hyönteiset taas menestyvät paremmin hyväkasvuisilla puilla. Myös stressin voimakkuus vaikuttaa olennaisesti hyönteisten menestymiseen. Monet hyönteislajit näyttävät menestyvän parhaiten "keskitason" stressiasteen puilla. Erittäin voimakas stressi heikentää puuta niin paljon, että sen laatu hyönteisten ravintona laskee (kuva 1).



Kuva 1. Kaaviokuva eräiden puilla elävien hyönteisryhmien oletetusta menestymisestä suhteessa puun stressin voimakkuuteen Larssonin (1989) mukaan.

Puolustautuminen kasvinsyöjiä vastaan

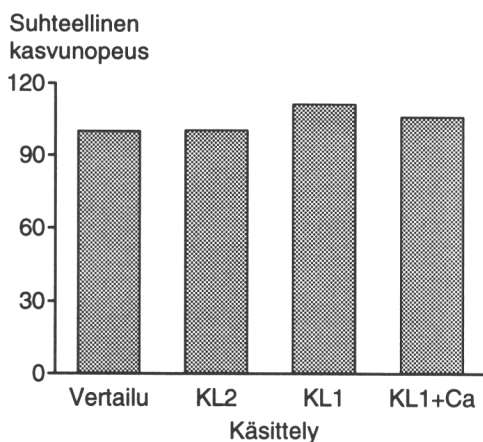
Neulasissa ja lehdistä tapahtuva yhteyttäminen tuottaa vedestä ja hiilidioksidista sokeria, jota puu käyttää energianlähteenä ja raaka-aineena erilaisten yhdisteiden muodostamisessa. Veden ja hiilidioksidin lisäksi puu tarvitsee ravinteita, joita se saa juurten kautta maaperästä. Puu käyttää yhteyttämistuotteitaan ensisijaisesti peruselintoimintoihin ja kasvuun, mutta myös ns. resistenssiyhdisteiden muodostamiseen. Nämä yhdisteet, esimerkiksi fenolit ja terpeenit, ovat haitallisia hyönteisille. Hiili/ravinnetasapainoteorian (Bryant ym. 1983) ja kasvu/erilaistumisteorian (Lorio 1986) mukaan resistenssiyhdisteiden määrä puussa riippuu siitä, paljonko yhteyttämistuotteita puu pystyy käyttämään kasvuun. Jos yhteyttäminen on tehokasta, mutta kasvua rajoittaa esimerkiksi typen puute, muodostuu "ylimääräisistä" sokereista resistenssiyhdisteitä. Kuivuus tai voimakas neulaskato taas vähentää yhteyttämistä, jolloin sokereita muodostuu vähän, ja niitä liikenee niukasti resistenssiyhdisteiden muodostamiseen. Tarvittaessa puu voi myös hajottaa resistenssiyhdisteitä ja käyttää niitä elintoimintojen ylläpitoon silloin, kun yhteyttäminen ei ole riittävän tehokasta.

Lannoituksen vaikutus puiden elinvoimaisuuteen ja hyönteistuholaisiin

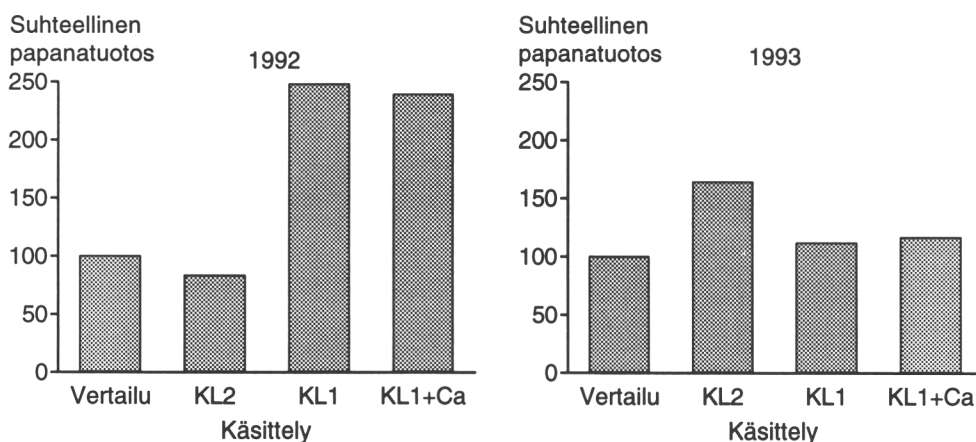
Lannoituksella voidaan vaikuttaa puiden elinvoimaisuuteen, mutta lannoituksen vaikutukset tuhonkestävyyteen ovat monensuuntaisia ja osin vaikeasti ennustettavia. Valikoiva lannoitus lisää puiden kasvua ja sillä voidaan esimerkiksi nopeuttaa neulaskadosta toipumista. Hyväkasvuinen puu kestää kasvinsyöjien aiheuttamat menetykset paremmin kuin huonokasvuinen (Wickman ym. 1992). Toisaalta lannoituksen on yleensä todettu parantavan puiden laatua tuholaisten ravintona, mikä saattaa houkuttaa tuholaisia lannoitettuihin puihin. Hiili/ravinnetasapainoteorian mukaan lannoituksen seurauksena neulasten ja lehtien ravinne- ja sokeritaso kohoaa ja hyönteisille haitallisten resistenssiyhdisteiden määrä usein vähenee. Neulaset ja lehdet sisältävät siis enemmän ravinteita ja vähemmän haitta-aineita, mikä on kasvinsyöjähyönteisille eduksi. Tästä huolimatta tuholaispopulaatioiden koon kasvun ei ole todettu olevan lannoitetuissa metsissä nopeampaa kuin lannoittamattomissa (esim. Mason ym. 1992). Tämä viittaa lannoituksella olevan ravintotekijöitten ohella vaikutusta myös tuholaiskantoja sääteleviin muihin tekijöihin, kuten loisintaan ja saalistukseen.

Metsien terveydetilan tutkimusohjelmassa tutkitaan ns. kunnostuslannoitteiden käyttöä puiden elinvoimaisuuden palauttamisessa. Eri puolille Suomea perustetuissa kokeissa on monien muiden lannoitusvaikutusten ohella mitattu myös lannoitteiden vaikutusta mäntyjen tuholaisresistenssiin. Kasvatuskokeissa mäntypistiäistoukkia ruokittiin neulasilla, jotka oli kerätty eri lannoituskäsittelyn saaneista ja lannoittamattomista männyistä. Lannoitusten seurauksena neulasten ravinnepitoisuudet kohosivat, mutta tällä ei ruokintakokeissa ollut merkittävää vaikutusta tärkeimmän männyn neulastuholaisen, ruskomäntypistiäisen (*Neodiprion sertifer*) toukkien menestymiseen. Sensijaan pilkkumäntypistiäisen (*Diprion pini*) toukat menestyivät hieman paremmin lannoitettujen puiden neulasilla (kuva 2). Kohonneen typpipitoisuuden on kasvatuskokeissa yleensä todettu parantavan hyönteisten menestymistä. Se, että tutkimuksessamme lannoituksella havaittiin olevan niin vähäinen vaikutus mäntypistiäistoukkiin, saattaa johtua siitä, että lannoitus on vaikuttanut myös neulasten rakenteeseen. Esimerkiksi neulasten pihkatiehyiden koko tai määrä on saattanut olla suurempi ja niiden sisältämien haitta-aineiden määrä korkeampi lannoitettujen puiden neulasissa (Björkman ym. 1991). Tällöin haitta-aineiden vaikutuksen voimistuminen kumoaisi kohonneen ravinnepitoisuuden myönteisen vaikutuksen toukkien menestymiseen.

Mäntypistiäiset munivat mäntyjen neulasiiin, ja munista kuoriutuvat toukat syövät neulasia kunnes pudottautuvat maahan ja koteloituvat humuskerrokseen. Mäntypistiäisten aiheuttamien neulastuhojen voimakkuutta ja pistiäispopulaation koon muutoksia arvioitiin lannoituskoealoilla mittaamalla kesän aikana puista varisevien papananoiden määrä (kuva 3) sekä kotelokoppien koko ja esiintymistiheys maassa. Lannoituskäsittelyillä ei havaittu olleen merkitsevää vaikutusta puuston tuhoasteeseen eikä pistiäispopulaation kokoon.

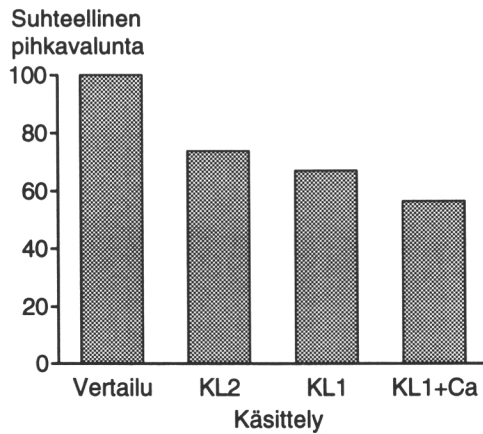


Kuva 2. Eri lannoituskäsittelyn saaneiden mäntyjen neulasilla ruokittujen pilkkumäntypistiäistoukkien (*Diprion pini*) suhteellinen kasvunopeus kasvatuskokeissa kesällä 1993. Vertailuarvona (100) lannoittamattomien puiden neulasilla ruokitut toukat. Puut lannoitettiin keväällä 1991. Lannoituskäsittelyt: KL2 = Koelannos 2 (P, K, Mg, Ca, B, Cu, Zn), KL1 = Koelannos 1 (N, P, K, Mg, Ca, B, Cu, Zn), KL1+Ca = Koelannos 1 ja kalkitus.



Kuva 3. Ruskomäntypistiäisten suhteellinen papanatuotos Jämijärven terveyslannoituskokeen eri lannoituskäsittelyissä kesäkuussa 1992 ja 1993. Vertailuarvona (100) papanamäärä lannoittamattomilla koealoilla. Lannoituskäsittelyt samat kuin kuvassa 1.

Kaarnakuoriaisaikuiset iskeytyvät puiden runkoihin ja munivat kuoren alle, missä kehittyvät toukat nakertavat nilakerrosta ravinnokseen. Kuoriaisten mukana kulkeutuu sinistäjäsieniä, jotka kasvavat toukkakäytävissä ja leviävät niiden ulkopuolelle tappaen edetessään puun solukoita. Kaarnakuoriaisiskeytymät ja niihin liittyvät sieni-infektiot johtavat helposti puun kuolemiseen. Runsas pihkaneritys rungosta estää kaarnakuoriaisia pääsemästä kuoren alle lisääntymään, ja vauriokohtaa ympäröivissä solukoissa muodostuvat puolustusyhdisteet, esimerkiksi fenolit, estävät myös sienirihmastojen kasvua. Koealoilla lannoituskäsittelyt alensivat keskimääräistä pihkaneritystä (g/vrk) mäntyjen rungoista (kuva 4). Pihkamäärän aleneminen lannoituksen seurauksena on odotettavissa oleva tulos kasvu/erilaistumisteorian perusteella, jos puun yhteyttämistuotteita kohdentuu entistä enemmän kasvuun ja vähemmän pihkan muodostamiseen (Lorio 1986). Lannoituksen aiheuttama pihkantuoton aleneminen mitatuissa kokeissa oli suhteellisen vähäistä, joten sillä tuskin on merkittävää vaikutusta männyn puolustautumiseen kaarnakuoriaisia vastaan. Lannoituksella ei tutkimuksessa havaittu olevan vaikutusta nilakerroksen kokonaisfenolipitoisuuteen.



Kuva 4. Keskimääräinen suhteellinen pihkavalunta mäntyjen rungoista neljän terveyslannoituskokeen eri lannoituskäsittelyissä suhteessa lannoittamattomien puiden pihkavaluntaan (=100). Lannoitukset tehty keväällä 1991, pihkavalutukset elokuussa 1992. Lannoituskäsittelyt samat kuin kuvassa 1.

Yhteenveto

Tulokset osoittivat, että vaikka neulasten laatu hyönteisten ravintona parani lannoituksen seurauksena, sillä ei ollut ratkaisevaa vaikutusta hyönteisten menestymiseen. Toisaalta lannoitettujen mäntyjen neulasmäärä kasvaa voimakkaasti (Lyytikäinen ym. 1993), mikä lisää puiden toipumiskykyä hyönteistuhousta. Terveyslannoitustutkimus on vasta alkuvaiheessa, joten lannoituksen pitkäkestoisista vaikutuksista ei vielä ole tietoa.

Kirjallisuus

- Björkman, C., Larsson, S. & Gref, R. 1991. Effects of nitrogen fertilization on pine needle chemistry and sawfly performance. *Oecologia* 86: 202-209.
- Bryant, J. P., Chapin III, F. S. & Klein, D. R. 1983. Carbon/nutrient balance of boreal plants in relation to vertebrate herbivory. *Oikos* 40: 357-368.
- Larsson, S. 1989. Stressful times for the plant stress - insect performance hypothesis. *Oikos* 56(2): 277-283.
- Lorio, P. L. Jr. 1986. Growth - differentiation balance: a basis for understanding southern pine beetle - tree interactions. *Forest Ecology and Management* 14: 259-273.
- Lyytikäinen, P., Niemelä, P., Annala, E. & Varama, M. 1993. Lannoituksen vaikutus männyn toipumiseen mäntypistiäistuhosta. *Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja* 460: 35-46.
- Mason, R. R., Wickman, B. E., Beckwith, R. C. & Paul, H. G. 1992. Thinning and nitrogen fertilization in a grand fir stand infested with western spruce budworm. Part I: Insect response. *Forest Science* 38(2): 235-251.
- Wickman, B. E., Mason, R. R. & Paul, H. G. 1992. Thinning and nitrogen fertilization in a grand fir stand infested with western spruce budworm. Part II: Tree growth response. *Forest Science* 38(2): 252-264.

Soluvaurioiden diagnostiikka

Sirkka Sutinen

Metsäntutkimuslaitos, Suonenjoen tutkimusasema
77600 Suonenjoki

Johdanto

Mikroskopiaa on käytetty jo pitkään lääketieteellisessä diagnostiikassa eli taudin/vaurion aiheuttajan tunnistamisessa. Mikroskopiaan perehtyneet lääketieteen tutkijat Laschi ja Govoni ovat vuonna 1985 todenneet solutasoisen tutkimuksen soveltuvuudesta syy/seuraussuhteiden selvittämiseen mm. seuraavaa: "Tämän päivän lääkärin täytyy omaksua "solutasoinen ajattelu" tautien arvioinnissa. Hienorakennetasoinen näkymä tarjoaa hänelle korvaamatonta tietoa, joka palvelee myös käytännön tarpeita. Sairastunut soluelin on jokaisen kliinisen oireen taustalla ja jokainen hoitotapahtuma täytyy kohdistaa tähän vaurion tyypilliseen kohtaan.". Edellä sanottu pätee myös havupuiden tutkimukseen. Solutasollahan kasveilla ja eläimillä ei ole sanottavia eroja lukuunottamatta sitä, että kasveilla on viherhiukkaset ja soluseinät. Nykyään elektronimikroskopia on käytössä lääketieteessä, joissa on kuvattu eri taudeille erilaiset solutasoiset muutokset. Myös havupuiden neulasista tunnetaan useita eri stressitekijöille ominaisia vaurio-oireita (esim. Soikkeli ja Kärenlampi 1984, Fink 1989).

Jatkossa käsitellään muutamain esimerkein solurakennetutkimuksien tuloksia kokeellisesti eri tavoin käsiteltyjen havupuiden sekä osin maastossa kasvaneiden puiden neulasista. Tuloksia voidaan tarkastella monesta näkökulmasta, kuten esimerkiksi miten havaittu solutasoinen muutos vaikuttaa kasvin toimintoihin tai mikä biokemiallinen muutos on edeltänyt rakenteellista muutosta. Tässä yhteydessä käsitellään lähinnä menetelmän sopivuutta syy/seuraussuhteiden selvittämiseen, työhön liittyviä epävarmuustekijöitä sekä toimenpiteitä ko. tekijöiden poistamiseksi ja analyysimenetelmän edelleenkehittämiseksi.

Menetelmä

Aikaisemmin kokeellisissa tutkimuksissa käytettiin korkeita saastepitoisuuksia ja lyhyitä kaasutusaikoja. Lukuunottamatta muutamia poikkeuksia, kuten esimerkiksi rikkidioksidin vaikutukset tehtaiden välittömässä läheisyydessä, tulosten soveltaminen maastoon oli vaikeaa. Tämän vuoksi uusimmissa tutkimuksissa on käytetty alhaisempia, luonnon tilannetta vastaavia saastepitoisuuksia ja pitkiä kaasutusaikoja. Kaasutuskokeita voidaan tehdä joko laboratorioissa suljetuissa kammioissa, joissa olosuhteet voidaan tarkoin säädellä tai maastossa joko kammioaltistuksina tai avokenttäkaasutuksina. Viimeksi mainituissa olosuhteiden säätelymekanismit ovat vaikeammin hallittavissa kuin laboratoriossa, mutta ekologinen vastaavuus on parempi.

Mikroskooppista tutkimusta varten neulasten solukko on säilytettävä mahdollisimman samanlaisena kuin se on keräyshetkellä. Tämän vuoksi näytteet on kiinnitettävä (fiksoitava). Epäonnistunut fiksaatio johtaa solutasolla rakenteessa havaittaviin "keinotekoisiiin" muutoksiin ns. artefakteihin. Esimerkiksi käytettävän puskuriliuoksen sopimaton väkevyys kiinnityksen aikana aiheuttaa viherhiukkasten ja soluliman tummumista sekä keskusvakuo-
lin tanniinin nauhoittumista (Soikkeli 1980; taulukko 1). Mikäli kerätyssä aineistossa on

syytä epäillä kiinnitysvirhettä, olisi aineisto kerättävä uudelleen, jotta virhearvioilta vältyttäisiin. Vaurioiden syy/seuraussuhteiden selvittämiseksi pitäisi kerätä mahdollisimman terveennäköisiä neulasia, koska väriivallisisissa neulasissa saattaa olla jo toissijaisia muutoksia, jotka myös saattavat johtaa väärään johtopäätökseen. Ensisijaisilla muutoksilla, joiden avulla pyritään haittaavan tekijän jäljille, tarkoitetaan tässä yhteydessä rakenteessa tavattavia varhaisoireita eikä niinkään todellisia ensisijaisia muutoksia, jotka tapahtuvat jo ennen rakennemuutosta biokemiallisella ja molekulaarisella tasolla.

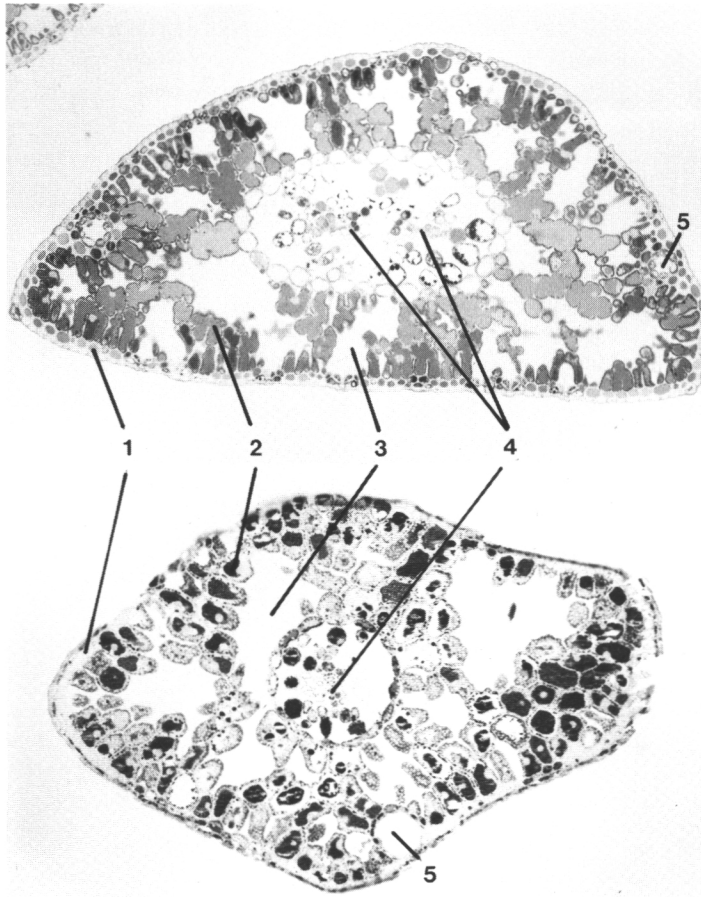
Taulukko 1. Eräiden haittatekijöiden aiheuttamia solutasoisia muutoksia havupuiden kahdessa nuorimmassa neulasvuosikerrassa. Tummennetulla pohjalla olevat muutokset ovat tyyppillisiä mainituille oireille. Muut oireet ovat yleisimpiä, useimpien haittatekijöiden yhteydessä havaittavia muutoksia.

Viherhiukkaset	Pakkanen	Kuivuus	SO ₂	O ₃	Hapan sade	Käsittelyvirhe
Koko	–	–	–	normaalia pienempi	normaalia suurempi	–
Muoto	–	pyöreä	pyöreä	litteä	–	–
Strooma	harva/ylim. ainetta keraantyy	tumma	–	tumma, rakeinen	–	tumma
Kalvosto	turvonnut	turvonnut, laineileva	turvonnut	–	lisääntyy	–
Plastoglobulit	–	määrä lisääntynyt	määrä lisääntynyt väri ja muoto muuttunut	määrä lisääntynyt	–	–
Solukalvo	rakkuloitunut irronnut	–	–	–	rakkuloitunut	–
Solulima	harva ylim. ainetta keraantyy tuhoutunut	rasvojen kasaantuminen	tumma, rasvojen kasaantuminen	harva	rasvojen kasaantuminen voimakkaasti rakkuloitunut	tumma
Tanniini	nauhamainen	–	nauhamainen	–	–	nauhamainen

Neulasen normaali rakenne

Kuusen ja männyn neulaset eroavat ulkomuodoltaan toisistaan. Ero näkyy myös neulasten poikkileikkauksessa (kuva 1). Neulasen sisärakenteessa ero näkyy mm. solujen muodossa, joka on männyllä piparkakkumainen ja kuusella kuutiomainen, sekä johtosolukoiden määrässä, joita männyllä on kaksi ja kuusella yksi. Lisäksi kuusen voi erottaa männystä viherhiukkasissa olevien rasvapallosten avulla, jotka kuusella ovat ryhminä ja männyllä hajallaan. Muussa suhteessa soluelimet ovat samanlaisia. Samanlaisuus havaitaan myös suhteessa haittaaviin tekijöihin siten, että sama haittatekijä aiheuttaa yleensä samanlaisen oireen solutasolla, olipa kysymyksessä kuusen tai männyn neulanen.

Neulasen poikkileikkauksessa on erotettavissa useita solukoita (kuva 1). Uloimpana on litteistä soluista muodostunut pintasolukerros, epidermi. Epidermin alla on toinen pintasolukerros, hypodermi, jonka solut ovat kuutiomaisia ja pienehköjä. Näiden kerrosten alla on yhteyttävä solukko, mesofylli. Se huolehtii neulasen ja koko puun energian tuotosta, joten on selvää, että kyseisen solukon vaurioituminen heijastuu puun kuntoon. Mesofyllissä on soluvälitiloja (ilmaonteloita) sekä pihkatiehyeyitä.

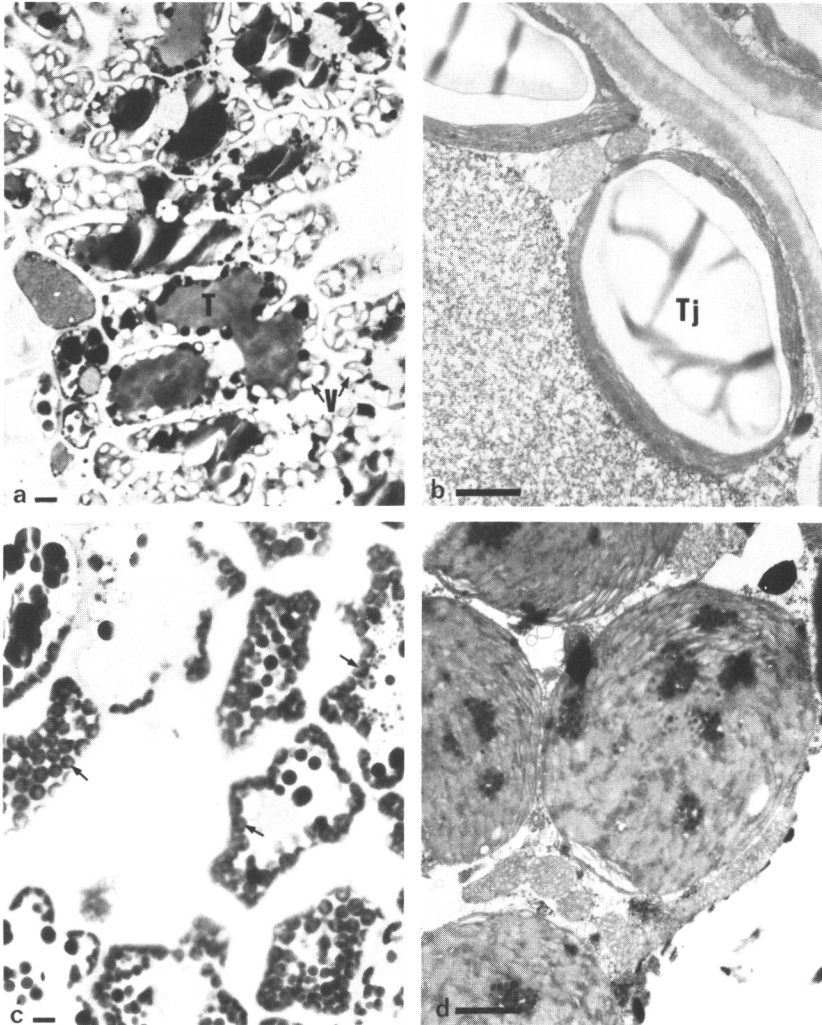


Kuva 1. Männyn (ylempi) ja kuusen (alempi) neulasen poikkileikkaukset. Neulasten ja solujen muoto on erilainen, mutta kummankin puun neulasissa on nähtävissä samat solukot. Uloinna on pintasolukot (1), joiden alla on yhteyttävä solukko (2). Se koostuu männyllä piparkakkumaisista ja kuusella kuutiomaisista soluista. Yhteyttävässä solukossa on myös soluvälitiloja (3) sekä pihkatiehyitä (5). Neulasten keskellä on johtojänne, jota ympäröi litteiden solujen muodostama solukerros. Johtojänteessä ovat johtosolukot (4), joita kuusen neulasessa on yksi ja männyn neulasessa kaksi.

Energian tuotto tapahtuu viherhiukkasissa, joissa hiilidioksidista ja vedestä muodostetaan auringon valon avulla hiilihydraatteja. Viherhiukkaset ovat muodoltaan jyvämäisiä. Kasvukauden aikana niissä on tärkkelystä (kuvat 2a ja b). Viherhiukkasen sisärakenteessa erotetaan vaaleahkona näkyvä perusmassa, strooma ja nauhamaisena rakennelmana näkyvä kalvosto (kuva 2b). Lisäksi hiukkasissa näkyy tummana pieniä rasvapalloisia, plastoglobuleita. Viherhiukkasten lisäksi yhteyttävissä soluissa on muitakin soluelimiä kuten mitokondriot, jotka huolehtivat solun hengityksestä, ja tuma, joka ohjailee solun toimintoja.

Yhteyttävän solukon sisällä neulasen keskellä on johtojänne, jota ympäröi litteiden solujen muodostama solukerros, endodermi. Tämän sisäpuolella on puu- ja nilasolukko (johtosolukko; kuva 1). Edellinen huolehtii veden ja ravinteiden, ja jälkimmäinen yhteytystuotteiden

kuljettamisesta, joten kyseisten solukoiden vaurioituminen on puulle haitallista ja ajan mittaan jopa tuhoisaa.



Kuva 2 a) Valomikroskooppikuva terveen männyn neulasen yhteyttävästä solukosta. Neulainen on kerätty kesällä, jolloin kasvukaudelle tyypillisesti viherhiukkasissa (V) on suuret tärkkelysjuväset. Solujen keskellä on tanniinin (T) täyttämä keskusvakuoli. Mittajana on 6 µm.

b) Elektronimikroskooppikuva terveen männyn neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkasista kesätilanteessa. Tärkkelysjuvänen (Tj) näkyy vaaleana rakeena viherhiukkasissa, joiden perusmassa on vaalea. Mittajana on 1 µm.

c) Veden puutteesta aiheutunut solumuutos kuusen neulasessa. Viherhiukkaset (nuolet) ovat pyöreitä eikä niissä ole kasvukaudelle tyypillisiä tärkkelysjuväsiä. Mittajana on 6 µm.

d) Elektronimikroskooppikuva kuvan 2c neulasesta. Mittajana on 1 µm.

Diagnostisen työn kannalta tärkeitä ovat mm. seuraavat terveistä neulasista tehdyt havainnot:

- 1) Neulasten rakenne on pieniä, usein vuodenaikaan liittyviä yksityiskohtia lukuunottamatta samanlainen kaikkialla terveessä puussa (Sutinen ym. 1990).
- 2) Samanikäisten, terveiden neulasten rakenne on samanlainen kaikenikäisissä puissa (Sutinen 1987a, Holopainen ja Nygren 1989).
- 3) Samanikäiset, terveet neulaset ovat samanlaisia rakenteeltaan Keski-Euroopasta Suomen Lappiin. Samanlaisuus pätee myös eri korkeuksilta kerättyjen terveiden neulasten kesken (esim. Soikkeli ja Kärenlampi 1984, Sutinen 1987a). Myös erilaisilla maaperillä kasvaneiden puiden neulaset ovat solutasolla samanlaisia ellei varsinaista ravinnepuutetta ilmene.

Jatkossa mainitaan kunkin haittatekijän yhteydessä kullekin ominainen oireisto. Mahdolliset muut epäspesifiset oireet tai vaurioiden loppuvaiheessa tavatut muutokset on esitetty vain taulukossa 1.

Luontaiset haittatekijät

Vaurioitumisen erottamiseksi on tunnettava paitsi varsinaisten haittatekijöiden vaikutukset myös neulasten ikääntymiseen liittyvät rakennemuutokset. Vanhenevassa neulasessa viherhiukkaset kapenevat, perusmassa harvenee ja rasvat lisääntyvät sekä viherhiukkasissa että solulimassa (Sutinen 1987a, Holopainen ym. 1992). Kuusella muutokset alkavat näkyä nelivuotiaissa neulasissa, minkä jälkeen muuttuneiden solujen osuus vähitellen lisääntyy, kunnes noin yhdeksän vuoden iässä suurin osa yhteyttävän solukon soluista on muuttunut. Ilmansaasteiden vaikutukset puolestaan näkyvät jo ensimmäisen ja toisen vuoden neulasissa, joten vanhenemista ja ilmansaasteiden aiheuttamia oireita ei yleensä voi sotkea toisiinsa, jos tutkittavaksi kerätään nuorimpia neulasvuosikertoja.

Keinotekoisesti aiheutettu maaperän kuivuus, jossa veden saantia vähennettiin hitaasti samaan tapaan kuin luonnossa sateettomina aikoina, aiheutti soluissa tärkkelysjyvästen häviämisen ja viherhiukkasten pyöristymisen ja tummumisen (Sutinen 1991; kuvat 2c ja d; taulukko 1). Kun taimia kasteltiin, palautuminen oli havaittavissa jo viikon kuluttua oteuissa näytteissä viherhiukkasiin kerääntyneenä tärkkelyksenä. Pienillä ruukkutaimilla, joilta kastelu lopetettiin kokonaan, oli alkuvaiheessa havaittavissa samat oireet kuin edellämainitussa maastokokeessa. Kuivuuden loppuvaiheessa ruukkutaimien neulasten solukalvot irtosivat ja osassa soluista oli todettavissa selviä ravinnepuutosoireita, koska neulanen ei saanut veden mukana tavallisesti tulevia ravinteita. Viherhiukkasten pyöristymistä ja samanaikaista asteittaista tärkkelyksen häviämistä ei ole todettu muiden haittatekijöiden yhteydessä. Kentällä tehdyissä lukuissa tutkimuksissa kyseinen oireisto on todettu äärimmäisen harvoin.

Talvella pakkasesta ei yleensä ole havupuille haittaa, mutta alkukesällä melko vähäinenkin halla saattaa vaurioittaa niiden uusia kasvaimia. Kokeellisissa tutkimuksissa on sekä hallan että talviaikaisen pakkasen varhaisimpina oireina todettu mm. soluliman rakenteen harveneminen sekä tummien kasautumien ilmaantuminen viherhiukkasiin (mm. Holopainen ja Holopainen 1988; taulukko 1). Vaurion edetessä solun ulkokalvo tuhoutuu ja irtaantuu soluseinistä, jolloin solun sisältö painuu kasaan ja soluseinät murtuvat. Koko yhteyttävä solukko vaurioituu tasaisesti. Maastotutkimuksissa pakkasen aiheuttamia soluvaurioita on kuvattu vain harvoin (Soikkeli ja Kärenlampi 1984).

Ravinnepuutosten vaikutuksia havupuiden neulasten solukoihin on tutkittu vasta viime aikoina. Elektronimikroskooppisella tasolla ravinteiden puutosoireista tunnetaan mm. tyyppien aiheuttama yhteyttävän kalvoston väheneminen ja viherhiukkasten kutistuminen, joka alkaa neulasten sisäosista (vertaa myöhemmin mainittu otsonin vaikutus), ja kaliumin puutteen aiheuttama rasvojen kertyminen sekä keskuvakuolin solukalvon voimakas kihartuminen (Holopainen ym. 1992). Solukkotasolla useimpien ravinteiden puutteen on todettu ilmenevän ensin neulasten johtosolukossa, kun taas ilmansaasteiden vaikutukset näkyvät ensin yhteyttävässä solukossa (Fink 1989). Tutkimalla neulasten vaurioitumisjärjestystä on siis mahdollista saada selvyyttä siitä, onko vaurion aiheuttaja maasta vai ilmasta.

Myös hyöteiset vaurioittavat havupuiden neulasia. Ne jättävät tyyppillisiä purema- tai ime-mäjälkiä neulasten solukoon tai neulasten pinnalle. Sienitauti puolestaan on usein todettavissa solukossa tavattavista sienirihmoista. Virukset on hyvin pieniä, mutta niiden aiheuttamat tuhot hyötykasveilla voivat olla hyvinkin merkittäviä. Havupuiden virustauteja ei tällä hetkellä juurikaan tunneta.

Ilmansaasteiden vaikutukset

Useimmat jatkossa esitellyt esimerkitapaukset ovat kokeellisista altistuksista, joissa havupuita on käsitelty tunnetuimmilla ilmansaasteilla luonnossa tavattavilla pitoisuuksilla. Näytteet on otettu vielä silmämääräisesti vihreistä neulasista.

Korkea rikkidioksidipitoisuus (yli $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) aiheuttaa akuutin, äkillisen neulasvaurion. Suomessa tämäntasoisia rikkidioksidipitoisuuksia on yleensä vain rikkiä päästävien teollisuuslaitosten lähiympäristössä. Akuutti vaurio näkyy neulasten uloimpen solukerrostien solujen joukkotuhona. Äkillisten vaurioiden toisistaan erottaminen voi olla hankalaa. Tarkastelemalla vaurioituneiden solujen viereisiä, lievemmin vaurioituneita soluja on kuitenkin mahdollista tunnistaa oireisto ja jäljittää vaurion aiheuttajaa.

Alhaisempi, pitkäaikainen rikkidioksidipitoisuus ($20\text{--}100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) aiheuttaa mahdollisesti vuosiakin piilevänä esiintyvän kroonisen vaurion. Tämäntasoisia rikkidioksidipitoisuuksia (kuukausi- ja/tai vuosikeskiarvoina) on Suomessa mitattu mm. taajamissa ja teollisuuslaitosten vaikutusalueilla. Piilevä so. vihreissä neulasissa mikroskooppisesti havaittava vaurioituminen on kuvattu useiden rikkidioksidia päästävien teollisuuslaitosten läheisyydessä kasvavista kuusen ja männyn neulasista (Soikkeli 1981). Keskuvakuolin tanniini, joka normaalisti on pienempinä tai suurempina rakeina, näkyy vaurioituneissa solulimaltaan tummuneissa soluissa nauhamaisena keskuvakuolin reunoilla (taulukko 1). Vaurioituminen alkaa yhteyttävästä solukosta ilmarakojen ja ilmaonteloiden läheisyydestä.

Elektronimikroskoopilla solulimassa nähdään suuria, epämääräisen muotoisia rasvakasau-mia. Usein koko solun sisus on ikäänkuin litistynyt soluseinän ja paksun tanniinikerroksen väliin. Viherhiukkaset saattavat pyöristyä ja niiden rasvapalloset, plastoglobulit ovat muuttuneet epämääräisen muotoisiksi ja näkyvät joko vaaleina tai pahimmillaan reikämäisinä (taulukko 1). Edellä kuvattuja oireita on todettu myös kokeellisesti rikkidioksidille altiste-tuissa havupuiden neulasissa (Kärenlampi ja Houpi 1986).

Suorien kasvivaikutusten lisäksi rikkidioksidi vaikuttaa kasveihin myös happamoittamalla sadevettä. Hapansadetutkimuksissa on yleensä selvitetty maaperämuutoksia ja sitä kautta kasveihin heijastuvia vaikutuksia. Tutkimuksissa, joissa havupuita on sadetettu happamoit-tetulla vedellä (pH = 3,0-5,7), neulasissa on voitu todeta suoria solutasoisia oireita jo yhden

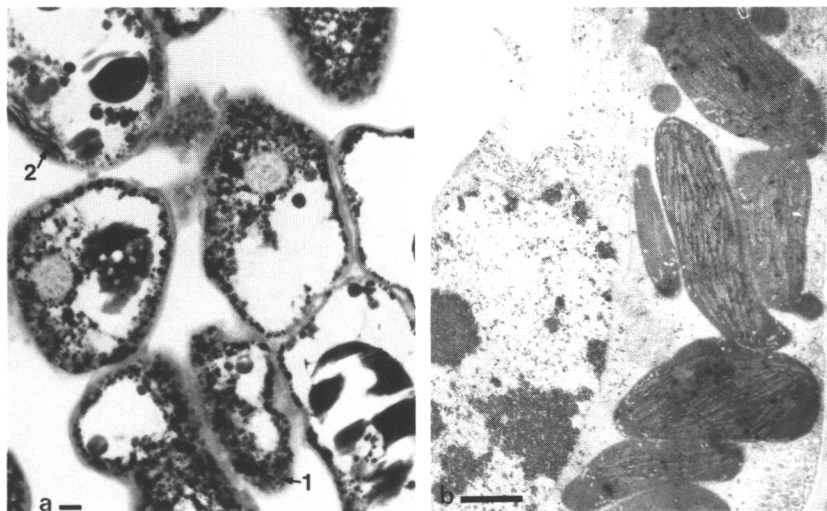
kasvukauden aikana (Holopainen ja Nygren 1989, Sutinen 1991). Vaurio näkyy ensin yhteyttävässä solukossa, mikä on tyypillistä myös muille ilmansaasteille. Solutasolla on ensimmäisenä havaittavissa solun ulkokalvon voimakas rakkuloituminen. Myöhemmässä vaiheessa rakkuloituminen näkyy myös solulimassa (taulukko 1). Lisäksi viherhiukkasten koon on todettu suurenevan ja yhteyttävän kalvoston lisääntyvän. Näiden muutosten on arveltu johtuvan altistusvedessä olevasta typestä eikä niinkään veden happamuudesta (Bäck ja Huttunen 1992).

Typen oksidit ovat kasveille vähemmän myrkyllisiä kuin rikin oksidit. Typen oksideista muodostuu kuitenkin ilmakehässä kemiallisissa reaktioissa otsonia, joka on kasveille haitallinen kaasu. Suomessa mitatut otsonipitoisuuksien kuukausikeskiarvot kasvukauden aikana ovat 60-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. Pitoisuuksissa ei ole havaittu suuriakaan eroja eteläisen ja pohjoisen Suomen välillä. Otsoni, kuten rikkidioksidikin, aiheuttaa sekä akuutteja että kroonisia vaikutuksia. Äkilliselle, korkean otsonipitoisuuden (useita satoja mikrogrammoja/ m^3) aiheuttamalle vauriolle on tyypillistä neulasen ja lehden ilmarakojen läheisyydessä olevien solujen tuhoutuminen. Solutasoisissa muutoksissa on samoja piirteitä kuin jäljempänä kuvatussa kroonisessa oireistossa.

Alhaisemmat (60-100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), mutta pitkäaikaiset otsonipitoisuudet aiheuttavat neulasin piilevän oireiston, joka alkaa aina neulasen yläpinnan soluista. Kun kaasutus jatkuu, vaurio etenee asteittain sisempiin solukerroksiin. Solutasolla otsonin aiheuttama muutos näkyy ensin viherhiukkasten pienenemisenä (kuva 3). Samanaikaisesti hiukkasten perusmassa tummuu ja rakeistuu (taulukko 1). Solulima ja sen muut elimet ovat useimmiten terveen näköisiä vielä soluissa, joissa viherhiukkaset ovat vain puolet normaalista koostaan (Sutinen ym. 1990; kuva 3b). Otsonille tyypillinen oireisto on nykyisin varsin yleinen maastosta kerätyissä havupuiden näytteissä.

Viime aikoina on kiinnitetty huomiota myös kloorattuihin hiilivedyihin ja niiden aiheuttamiin kasvivaikutuksiin. Yhdisteet säilyvät sekä maaperässä että pitkän viipymän vuoksi myös ilmassa kauan ja pystyvät siten kulkeutumaan kauas päästölähteistään. Hiilivedyistä muodostuu mm. trikloorietikkahappoa, TCA:ta, jota on aiemmin käytetty yleisesti heinämaisten kasvien, kuten juolavehnän torjuntaan. Nyttemmin TCA:ta on mitattu puiden neulasista ja lehdistä alle 150 ng/g olevia pitoisuuksia sekä Suomen eri osista että Etelä-Saksasta. Klooratuilla hiilivedyillä on arveltu olevan osuutensa myös metsien vaurioitumiseen. Kokeellisia tutkimuksia näillä aineilla on toistaiseksi tehty vain muutamia. TCA:lla altistetuissa männyn neulasissa on todettu mm. rasvojen lisääntyvän viherhiukkasissa ja solulimassa sekä viherhiukkasten pienenevän. Tässä tapauksessa hiukkasten pienenemiseen ei liittynyt perusmassan tummumista eikä rakeistumista kuten otsonialtistuksen yhteydessä.

Muista saasteista, joiden vaikutus yleisimmin on paikallinen (onnettomuudet, tien suolaus) on havupuilla tutkittu mm. fluoridien, kloorikaasun ja suolan solutasoisia vaikutuksia (mm. Holopainen ym. 1992). Näilläkin saasteilla on todettu kullekin haitatekijälle ominainen vaurioitumisoireisto.



Kuva 3a) Otsenin ja rikkidioksidin aiheuttama muutos kuusen neulasen yhteyttävässä solussa. Viherhiukkaset ovat pienentyneet niin, että niitä on vaikea erottaa valomikroskooppisesti. Otsonille tyypillinen asteittainen viherhiukkasten pieneneminen näkyy myös yhdessä rikkidioksidin kanssa (1-nuolet: uloimmat ja pienimmät viherhiukkaset, 2-nuolet: sisimmät ja suurimmat viherhiukkaset). Mittajana on 6 μm .

b) Elektronimikroskooppikuva otsonille altistetun kuusen neulasen yhteyttävästä solusta. Viherhiukkaset ovat pieniä (vertaa esim. kuvan 2d viherhiukkasiin), niiden perusmassa on tumma ja rakeinen. Muut soluelimet ja solulima ovat vielä normaalin näköisiä. Mittajana on 1 μm .

Eri saasteyhdistelmien sekä saasteiden ja luontaisten haittatekijöiden yhteisvaikutuksia on tutkittu jonkin verran. Rakennetutkimuksin on selvitetty mm. otsenin ja rikkidioksidin yhteisvaikutuksia. Kaksi kuukautta kestäneiden kaasutusten jälkeen otetuissa näytteissä yhteyttävän solukon viherhiukkaset olivat niin pieniä, että ne eivät enää erottuneet valomikroskooppisilla suurennoksilla, joilla terveen neulasen hiukkaset erottuvat hyvin (Sutinen 1987b; kuva 3a). Lisäksi viherhiukkasten muoto oli muuttunut jyvämäisestä mato- tai nuijamaiseksi, yhteyttävä kalvosto vähentynyt ja rasvapallosten määrä lisääntynyt. Yhteiskaasutus aiheutti huomattavasti pahemman soluvaurion kuin sama määrä otsonia yksin. Lisäksi on selvitetty mm. happaman sateen ja kaliumin puutteen (Holopainen ja Nygren 1989) ja toisaalta happaman sateen ja pakkasen (Huttunen ym. 1990) yhteisvaikutuksia. Yhteisvaikutuksista voi yleensä todeta, että vaikutus on pahempi kuin yksittäisen tekijän aiheuttama vaurio. Rakennetasolla useamman samanaikaisesti vaikuttavan tekijän aiheuttamat oireistot ovat erotettavissa toisistaan. Oireistot voivat esiintyä päällekkäisinä samassa solussa tai erillään vierekkäisissä soluissa. Maastonäytteissä on varsin yleistä, että solussa/solukossa on useampaan haittatekijään liitettäviä oireita, mikä solutasolla viittaa ns. monistressivaurioon.

Epävarmuustekijöitä ja parannusehdotuksia

Havupuiden neulasten mikroskooppinen diagnostinen analytiikka on tieteenalana varsin nuori. Ainakin osittain johtuen juuri tästä, diagnoosia on aika-ajoin pidetty epävarmana. Epävarmuutta ovat saattaneet aiheuttaa myös tietyt diagnoosia haittaavat tekijät, jotka on mainittu aiemmin myös lääketieteellisen diagnostiikan yhteydessä (Collan ym. 1984). Taulukossa 2 on mainittu eräitä diagnoosia häiritseviä tekijöitä sekä näiden tekijöiden vaikutuksia sekä ehdotuksia, joilla diagnoosin luotettavuutta voidaan parantaa. Mikroskooppisen diagnostiikan varmentamiseksi on tietenkin suotavaa, että tutkittavasta aineistosta voitaisiin määrittää samanaikaisesti esimerkiksi neulasten ravinnepitoisuus tai tehdä biokemiallisia analyysejä.

Taulukko 2. Eräitä tekijöitä, jotka saattavat hankaloittaa mikroskooppisesti havaittavan vaikutuksen tulkintaa sekä ehdotuksia haittatekijöiden välttämiseksi ja diagnostisen analytiikan parantamiseksi.

Tekijä	Vaikutus	Parannusehdotukset
Kiinnitysvirhe	Artefakti & huono erottuvuus → väärä diagnoosi	Kerää uusi aineisto
Eri värjäysmenetelmät	Soluelimien erottuminen erilainen	Tuloksia verrattava varoen (tulokset eivät välttämättä ole ristiriitaisia)
Saastepitoisuus - korkea - matala	- äkillinen vaurio - krooninen vaurio	Tuloksia on verrattava mahdollisimman samansuuruisen annoksen saaneeseen vertailuaineistoon
Neulasten kunto - vihreä - kellastunut tms.	- vaurion varhaisvaiheet - vaurion loppuvaiheet	Tuloksia on verrattava vastaavaan vertailuaineistoon, esim. vihreää vihreään
Useita nimiä samalle muutokselle	Sekaannusta tulosten ymmärtämisessä	Nimistö olisi yhdenmukaistettava
Analyytit tehty eri soluelimistä	Saman tekijän aiheuttamat muutokset näennäisesti erilaisia. Esim. muutos on solulimassa. Tutkitaan vain viherhiukkaset → tulos on "ei muutosta". Tutkitaan koko solu → tulos on "selvä muutos"	Kaikki soluelimet olisi analysoitava
Tarkastelu tehdään kolmiulotteisesta todellisuudesta kaksiulotteisella tasolla	Aiheuttaa sekaannusta varsinkin vasta-alkajilla. Saattaa johtaa virheellisiin päätelmiin	Analysoija on huolellisesti koulutettava työhön
Kuvailevat, kvalitatiiviset tulokset	Vähäiset, jopa epäspesifiset muutokset saattavat ylikorostua	Muutos on määritettävä tarkasti ja tehtävä morfometrinen analyysi diagnoosin pohjaksi

Päätelmiä

Tähänastiset mikroskooppiset tutkimukset ovat osoittaneet, että eri stressitekijät aiheuttavat havupuiden neulasiin erilaisia, toisistaan erotettavia vaurio-oireita. Edellyttäen, että tutkittavasta aineistosta selvitetään vaurio-oireisto eikä vain yksittäisiä muutoksia, mikroskooppinen menetelmä soveltuu hyvin myös käytännön diagnostiseen työhön.

Menetelmää on edelleen kehitettävä kvalitatiivisesta, kuvailevasta vaiheesta kvantitatiiviseen, morfometriseen vaiheeseen. Taustatietojen luotettavuuden ja oireistojen tunnistettavuuden lisäämiseksi tarvitaan myös uusia altistuskokeita.

Diagnostiikan kehittäminen ja luotettavuus vaatii myös opettelua oireiston tunnistamisessa. J.W. Goethen väitetään sanoneen " Man sieht nur was man weiss" eli näet vain sen minkä tunnet. Sanonta on mitä suurimmassa määrin totta myös diagnostisessa analytiikassa, joka onnistuakseen vaatii huolellista ja tarkkaa analysoijan kouluttamista ennen varsinaiseen työhön ryhtymistä.

Kirjallisuus

- Bäck, J. & Huttunen, S. 1992. Structural responses of conifer seedlings to acid rain treatment. *New Phytol.* 120: 77-88.
- Collan, Y., Aalto, M.-L., Koska, V.-M., Naukkarinen, A., Romppanen, T. & Syrjänen, K. (toim.), 1984. Stereology and morphometry in pathology. Kuopio University Press, 270 s.
- Fink, S. 1989. Pathological anatomy of conifer needles subjected to gaseous air pollutants or mineral deficiencies. *Aquilo Ser. Botanica* 27: 1-6.
- Holopainen, T. & Holopainen, J. 1988. Cellular responses of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) seedlings to simulated summer frost. *European Journal of Forest Pathology* 18: 207-216.
- & Nygren, P. 1989. Effects of potassium deficiency and simulated acid rain alone and in combination on the ultrastructure of Scots pine needles. *Canadian Journal of Forest Research* 19: 1402-1411.
- , Anttonen, S., Wulf, A., Palomäki, V. & Kärenlampi, L. 1992. Comparative evaluation of the effects of gaseous pollutants, acidic deposition and mineral deficiencies: structural changes in the cells of forest plants. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 42: 365-398.
- Huttunen, S., Reinikainen, J. & Turunen, M. 1990. Wintering response to acid rain treatment under northern conditions. Julkaisussa: Kauppi, P., Anttila, P., & Kenttämies, K. (toim.) *Acidification in Finland*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg. s. 607-633.
- Kärelampi, L. & Houppis, J. L. J. 1986. Structural conditions of mesophyll cells of *Pinus ponderosa* var. *scopulorum* after SO₂ fumigation. *Canadian Journal of Forest Research* 16: 1381-1385.
- Soikkeli, S. 1980. Ultrastructure of the mesophyll in Scots pine and Norway spruce: seasonal variation and molarity of the fixative buffer. *Protoplasma* 103: 241-252.
- 1981. Comparison of cytological injuries in conifer needles from several polluted industrial environments in Finland. *Annales Botanici Fennici* 18: 47-61.
- & Kärenlampi, L. 1984. The effects of nitrogen fertilization on the ultrastructure of mesophyll cells of conifer needles in northern Finland. *European Journal of Forest Pathology* 14: 129-136.
- Sutinen, S. 1987a. Cytology of Norway spruce needles. I. Changes during ageing. *European Journal of Forest Pathology* 17: 65-73.
- 1987b. Ultrastructure of mesophyll cells of spruce needles exposed to O₃ alone and together with SO₂. *European Journal of Forest Pathology* 17: 362-368.
- 1991. Tissue and cellular effects of air pollutants on coniferous trees. Julkaisussa: Tikkanen, E. & Varmola, M. (toim.) *Research forest damage connected with air pollution in Finnish Lapland and the Kola Peninsula of the U.S.S.R. A seminar held in Kuusamo, Finland, 25-26. May 1990*. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 373: 101-108.
- , Skärby, L., Wallin, G. & Sellden, G. 1990. Long-term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., to ozone in open-top chambers. II. Effects on the ultrastructure of needles. *New Phytologist* 115: 345-355.

Kansi: Puiden elinvoimaisuuden vaikuttavia tekijöitä ja ilman epäpuhtauksien vaikutusmekanismeja.

Paintek Pihlajamäki Oy 1994

ISBN 951-40-1356-5

ISSN 0358-4283