

Metsäluonto ja ilmansaasteet

Metsäluonto ja ilmansaasteet

ISBN 951-40-1270-4

Gummerus Kirjapaino Oy
Jyväskylä 1993

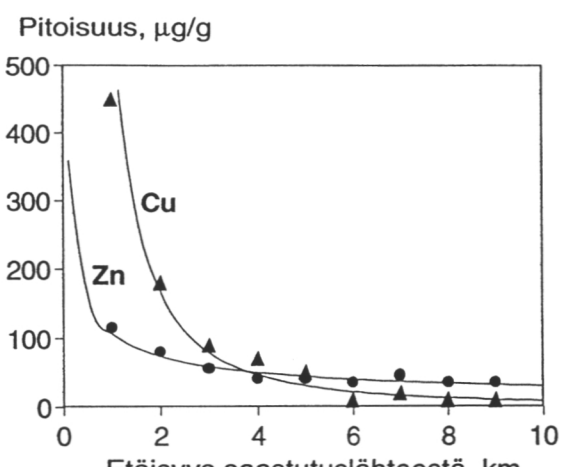
VIRHE:

s. 111, kuva 70

Mänty ja kuusi vaihtaneet paikkaa.

s. 177, kuva 128

Neulasten pitoisuudet virheelliset. Ohessa oikeat arvot.



Metsäluonto ja ilmansaasteet

Toimittajat:

Arja Hyvärinen
Eeva-Liisa Jukola-Sulonen
Heli Mikkelä
Tiina Nieminen

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446, Helsinki 1993

Sisällys

Artikkelien kirjoittajat 7

Alkusanat 8

1. METSIEN TILAAN VAIKUTTAVAT TEKIJÄT 9
1.1 Metsien käyttö, *Pekka Kilkki ja Kari Mielikäinen* 10
1.2 Ilman laatu Suomessa, *Arja Hyvärinen* 12
1.3 Ilmansaasteet ja kasvillisuus, *Kari Mikkola* 18
1.4 Metsämaa, *Eino Mälkönen ja Pekka Tamminen* 22
1.5 Metsien sieni- ja eläintuhot, *Kari Heliövaara, Rauno Väisänen ja Seppo Nevalainen* 25

2. METSIEN KASVU 30
2.1 Metsävarat ja metsien kasvu, *Pekka Kilkki ja Pekka Nöjd* 30
2.2 Puiden kasvu elinvoimaisuuden kuvaajana, *Pekka Nöjd* 32
2.3 Kasvumuutosten syyt, *Pekka Nöjd* 35

3. METSÄMAAN HAPPAMOITUMINEN 40
3.1 Hapan laskeuma ja metsikön ravinnekierto 40
Laskeuma metsiköissä, *Arja Hyvärinen* 40
Metsikön ja puun ravinnekierto, *Heljä-Sisko Helmisaari* 44
3.2 Metsämaan happamoituminen ja humuksen mikrobiologia, *Kristina Palmgren* 48
3.3 Metsämaan happamoitumistilanne Suomessa 54
Kangasmaiden happamoituminen, *Michael Starr ja Pekka Tamminen* 54
Turvemaiden happamoitumisherkkyys ja happamoitumistilanne, *Antti Pätilä* 58
3.4 Happamuuden neutraloituminen maassa, *John Derome* 61
3.5 Maanhoidollisin keinoin voidaan ehkäistä happamoitumista, *John Derome, Eino Mälkönen ja Antti Pätilä* 68

4. LATVUKSEN KUNTO JA PUUN ELINVOIMAISUUS 75
4.1 Puiden elinvoimaisuuden arvioiminen *Eeva-Liisa Jukola-Sulonen* 75
Latvustunnukset ja puun kasvu elinvoimaisuuden ilmentäjinä, *Maija Salemaa, Eeva-Liisa Jukola-Sulonen, Tiina Nieminen ja Pekka Nöjd* 77
Neulasten kemiallinen koostumus elinvoimatunnuksena, *Tiina Nieminen, Hannu Raitio ja Maija Salemaa* 92
Säät vaikuttavat männyn neulasten varisemiseen, *Jari Kouki ja Tatu Hokkanen* 96
Johtojännemenetelmällä saadaan tietoa neulasvuosikerroista puun koko elinajalta, *Risto Jalkanen ja Timo Kurkela* 97

4.2 Metsäpuiden elinvoimaisuus vuosina 1985–89 102
Harsuuntuneisuus valtakunnan metsien inventoinnin mukaan, *Hannu Yli-Kojola* 102
Metsien elinvoimaisuuden vuosittainen seuranta, *Eeva-Liisa Jukola-Sulonen, Maija Salemaa, Kari Mikkola, Martti Lindgren ja Tiina Nieminen* 105
Metsien harsuuntuneisuus Euroopassa 1989, *Eeva-Liisa Jukola-Sulonen* 116
Havupuiden käpysato 1987–89, *Maija Salemaa, Eeva-Liisa Jukola-Sulonen ja Martti Lindgren* 116
4.3 Ilmansaasteiden vaikutukset neulasten solurakenteeseen, *Sirkka Sutinen* 119

5. METSÄTUHOJEN ESIINTYMINEN 127
5.1 Metsiemme tärkeimpiä sienitauteja ja tuholaisia 127
Yleisimpiä metsien sienitauteja, *Seppo Nevalainen* 127
Yleisimpiä metsien tuholaisia, *Kari Heliövaara ja Rauno Väisänen* 130
5.2 Sieni-, eläin- ja abioottisten tuhojen yleisyys 132
Valtakunnalliset tulokset, *Seppo Nevalainen ja Hannu Yli-Kojola* 132
Tuhot ja harsuuntuneisuus, *Seppo Nevalainen* 135
Männynversosurman yleisyys vuosina 1986–89, *Seppo Nevalainen, Eeva-Liisa Jukola-Sulonen ja Maija Salemaa* 137

6. EPIFYYTIT JA ALUSKASVILLISUUS ILMANSAASTEINDIKAATTOREINA 139
6.1 Ilmansaasteet ja lajien yleisyys 139
Jäkälät, sammalet ja putkilokasvit ympäristön tilan kuvaajina, *Kari Mikkola* 139
Epifyyttijäkälien esiintyminen, *Kari Mikkola, Eeva-Liisa Jukola-Sulonen ja Mikko Kuusinen* 142
Karikeaineistojen avulla selvitetään muutoksia herkkien jäkälien esiintymisessä, *Mikko Kuusinen* 147
Leväpeite kuusen neulasilla merkki typpikuormasta *Eeva-Liisa Jukola-Sulonen, Mikko Kuusinen ja Päivi Merilä* 148
Neulasten pintamikrobit ja ilmansaasteet, *Seppo Nevalainen* .. 150
Aluskasvillisuuden muutokset, *Kari Mikkola ja Eeva-Liisa Jukola-Sulonen* 151
6.2 Sormipaisukarvejäkälän kemiallinen koostumus laskeuman kuvaajana, *Eero Kubin* 153

7. PAIKALLISIA METSÄVAURIOITA JA KOKEELLISIA TUTKIMUKSIA 159
7.1 Tausta-alueet 159
Pohjois-Suomen neulaskato kesällä 1987, *Eero Tikkanen ja Hannu Raitio* 159
Sallan puustovauriot, *Hannu Raitio, Eero Tikkanen ja Pekka Nöjd* 162
Lehtipuilla lehtikatoa Etelä-Suomessa, *Hannu Raitio* 166
7.2 Kuormitetut alueet 168
Havupuiden elinvoimaisuus Uudenmaan keskiosissa, *Eeva-Liisa Jukola-Sulonen ja Markku Korhonen* 168
Typpilaskeuman vaikutukset turkistarhojen lähimetsissä, *Ari Ferm, Jyrki Hytönen, Pekka Lähdesmäki, Pekka Pietiläinen ja Antti Pätilä* 170
Tuhohyönteisten menestyminen kuormitetuilla alueilla, *Kari Heliövaara ja Rauno Väisänen* 176

7.3 Kokeellisia tutkimuksia 181
Männyntaimien alkukehitys saastuneessa maassa, *Sara Niini ja Hannu Raitio* 181
Happaman kastelun vaikutus sienitautien esiintymiseen, *Martti Vuorinen* 183
Ilmansaasteiden vaikutukset männyn neulastuholaisiin, *Kari Heliövaara ja Rauno Väisänen* 186

8. METSÄTUHOJEN TALOUDELLISET VAIKUTUKSET
Keski-Euroopan metsätuhojen vaikutus Suomen metsäsektoriin, *Heikki Seppälä, Risto Seppälä ja Markku Kallio* 189
Suomen metsätuhojen taloudelliset vaikutukset, *Heikki Seppälä, Risto Seppälä ja Markku Kallio* 192

9. YHTEENVETO JA PÄÄTELMIÄ 193

Liite 1. Aineiston keruu, *Arja Hyvärinen ja Heli Mikkelä* 200
Liite 2. Laboratorion analyysimenetelmistä, *Maija Jarva ja Arja Tervahauta* 204

Termien selityksiä 209

Julkaisussa käytetyt kasvien, sienten ja eläinten nimet 212

Hakemisto 214

Kuusen ja männyn harsuuntumissarja, *Eeva-Liisa Jukola-Sulonen* 220

Artikkelien kirjoittajat

John Derome, MML, METLA, Rovaniemen tutkimusasema
Ari Ferm, MMT, METLA, Kannuksen tutkimusasema
Kari Heliövaara, dos., METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Heljä-Sisko Helmisaari, MMT, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Tatu Hokkanen, MMK, METLA, Metsänkasvatuksen tutkimusosasto
Jyrki Hytönen, MML, METLA, Kannuksen tutkimusasema
Arja Hyvärinen, FK, METLA, Metsäntutkimuslaitoksen kirjasto
Risto Jalkanen, dos., METLA, Rovaniemen tutkimusasema
Maija Jarva, FT, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Eeva-Liisa Jukola-Sulonen, FT, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Markku Kallio, prof., Helsingin kauppakorkeakoulu
Pekka Kilkki (†), prof., METLA
Markku Korhonen, FK, Juuan kunta, Peruskoulun yläaste
Jari Kouki, FT, Helsingin yliopisto, Eläintieteen laitos
Eero Kubin, dos., METLA, Muhoksen tutkimusasema
Timo Kurkela, prof., METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Mikko Kuusinen, FK, Helsingin yliopisto, Kasvitieteen laitos
Martti Lindgren, FK, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Pekka Lähdesmäki, prof., Oulun yliopisto, Kasvitieteen laitos
Päivi Merilä, MMK, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Kari Mielikäinen, prof., METLA, Metsänkasvatuksen tutkimusosasto
Heli Mikkelä, MMK, METLA, Metsänkasvatuksen tutkimusosasto
Kari Mikkola, FK, METLA, Rovaniemen tutkimusasema
Eino Mälkönen, prof., METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Seppo Nevalainen, MH, METLA, Joensuun tutkimusasema
Tiina Nieminen, MML, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Sara Niini, FK, Helsingin yliopisto, Kasvitieteen laitos
Pekka Nöjd, MMK, METLA, Metsänkasvatuksen tutkimusosasto
Kristina Palmgren, MMK, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Pekka Pietiläinen, FL, METLA, Muhoksen tutkimusasema
Antti Pätilä, MMK, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto ja Helsingin yliopiston Lahden tutkimus- ja koulutuskeskus
Hannu Raitio, FT, METLA, Parkanon tutkimusasema
Maija Salemaa, FL, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Heikki Seppälä, MMK, METLA, Metsien käytön tutkimusosasto
Risto Seppälä, prof., METLA, Metsien käytön tutkimusosasto
Michael Starr, Ph.D., METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Sirkka Sutinen, FT, METLA, Suonenjoen tutkimusasema
Pekka Tamminen, MMT, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Arja Tervahauta, FK, METLA, Metsäekologian tutkimusosasto
Eero Tikkanen, FL, METLA, Rovaniemen tutkimusasema
Martti Vuorinen, FK, METLA, Suonenjoen tutkimusasema
Rauno Väisänen, FT, Vesi- ja ympäristöhallitus, Luonnonsuojelun tutkimusyksikkö
Hannu Yli-Kojola, MMK, METLA, Metsien käytön tutkimusosasto

(METLA = Metsäntutkimuslaitos)

Alkusanat

Metsäntutkimuslaitokselta on odotettu valtion tutkimuslaitoksena vastauksia moniin vaikeisiin metsien tilaa koskeviin kysymyksiin. Keski-Euroopan metsävauriot ja Suomenkin metsissä havaitut muutokset ovat herättäneet julkisen keskustelun maamme metsien terveydentilasta. Metsien kunnosta ja niihin vakuttavista tekijöistä on julkaistu ja julkaistaan jatkuvasti monia tieteellisiä artikkeleita, mutta lisäksi on ollut tarvetta koota erillisiin artikkeleihin sisältyvästä tiedosta suomenkielinen kirja ilmansaasteiden vaikutuksesta Suomen metsiin.

Teokseen on koottu Metsäntutkimuslaitoksen tutkimustietoa metsien terveydentilasta ja ilman epäpuhtauksien vaikutuksesta siihen. Tutkimustuloksia on saatu lähinnä Maa- ja metsätalousministeriön sekä Ympäristöministeriön yhteisestä valtakunnallisesta *Happamoitumistutkimus*-projektista (HAPRO, 1985–89) ja Metsäntutkimuslaitoksen *Ilman epäpuhtauksien vaikutus metsiin* -projektista (ILME, 1983–90). Mukana on myös tietoja Metsäntutkimuslaitoksen pitkäaikaisista seurantatutkimuksista, mm. valtakunnan metsien inventoinneista aina 1920-luvulta lähtien.

Vaikka tiedon kartuttamiseksi on tehty paljon työtä, monet kysymykset ovat vielä vastauksia vailla. Ympäristömuutosten tieteellinen tutkimus tuottaa vastauksia esitettyihin kysymyksiin usein tarpeeseen nähden liian hitaasti.

Kirja on laadittu siten, että siitä voi saada yleiskäsityksen ilmansaasteiden vaikutuksesta metsiin, mutta koko sisällön omaksuminen edellyttää lukijalta hyvää biologian ja ekologian perustuntemusta.

Kirjan tekemisessä ovat auttaneet lukuisten rahoittajien lisäksi moniin kymmeniin nouseva tutkija- ja avustajakunta. Heille kaikille Metsäntutkimuslaitos esittää parhaat kiitoksensa.

1. Metsien tilaan vaikuttavat tekijät

Metsien tilaan vaikuttavat sekä luontaiset tekijät että ihmisen toiminta. Näiden vaikutukset voivat olla toisiaan vahvistavia tai heikentäviä.

Luontaisia, metsien tilaan ja puiden elinvoimaisuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. ilmasto, maaperä, tuhonaiheuttajat kuten hyönteiset ja sienet, puiden perinnölliset ominaisuudet jne. Nämä ovat lisäksi vuorovaikutuksessa keskenään, esimerkiksi säätila vaikuttaa taudinaiheuttajien lisääntymis- ja leviämismahdollisuuksiin. Myös kasvillisuuden keskinäinen kilpailu vaikuttaa puiden tilaan ja elinvoimaisuuteen.

Ihminen vaikuttaa toiminnallaan metsien tilaan sekä suoraan, esimerkiksi metsiä käsittelemällä, että välillisesti muuttamalla metsien tilaan vaikuttavia luontaisia tekijöitä. Metsien hakkuu, maanpinnan käsittely ja metsäojitus vaikuttavat puiden elinmahdollisuuksiin. Lisäksi ihmisen toiminta saattaa vaikuttaa tuhohyönteisten ja taudinaiheuttajien elinmahdollisuuksiin. Metsien hoitamatta jättäminen heikentää yleensä metsien tilaa, parantaa tuhonaiheuttajien elinoloja ja lisää myös ilmansaastetuhojen sekä abioottisten tuhojen esiintymistodennäköisyyttä.

Ihmisen toiminnan seurauksia ovat myös ilmansaasteet ja kasvihuoneilmiön voimistuminen. Ne vaikuttavat metsien elinvoimaisuuteen sekä suoraan (esim. ilmansaasteiden myrkkyvaikutukset) että välillisesti maaperän, tuhonaiheuttajien ja muiden luontaisten tekijöiden kautta.

1.1 Metsien käyttö

Suomen ilmastossa metsät kehittyvät luonnontilassa tavallisesti joko tasaikäisinä tai ns. monijaksoisina metsinä, joissa on vähintään kaksi tasaikäistä tai verraten tasaikäistä puukerrosta eli puujaksoa. Metsikön luonnonmukaiseen kehitykseen eli sukkessioon kuuluvat keskimäärin kerran sadassa vuodessa toistuvat metsäpalot, jotka hävittävät vanhan puuston joko kokonaan tai niin suuren osan siitä, että lehtipuiden ja männyn muodostama uusi puusukupolvi pääsee alkuun. Luonnonmukaiseen kehitykseen kuuluu myös metsän orgaanisen aineen palaminen tai lahoaminen, jolloin siihen sitoutuneet ravinteet vapautuvat uudelleen kasvillisuuden käyttöön.

Metsien käytön historiaa

Ihminen on kautta aikojen pyrkinyt muuttamaan metsäekosysteemin luonnonmukaista toimintaa. Vuosisatojen ajan Suomessa kaskettiin lähes kaikkia riittävän viljavilla kasvupaikoilla kasvavia metsiä. Kaskikausi päättyi tämän vuosisadan alussa, mutta vieläkin huomattava osa Itä-Suomen metsistä on vanhoille kaskialueille syntyneitä ensimmäisen sukupolven metsiä.



Kuva 1. Kaskiaho vuonna 1915. Valokuva: Olli Heikinheimo.



Kuva 2. Nykypäivän hoidettua metsää. Valokuva: Erkki Oksanen.

Kaskeaminen muutti metsien puulajirakennetta samaan tapaan kuin metsäpalo. Kuusen osuus väheni ja männyn sekä lehtipuiden osuudet kasvoivat.

Kaskeamisen ohella myös karjan metsälaiduntaminen vaikutti puulajisuhteisiin. Kuusi kestää hyvin laidunnusta, mutta sitä oli useimmiten vähän kasketuilla mailla. Toiseksi parhaiten laidunnusta kestää mänty; tuloksena olivat talojen lähistöllä männiköt, joista karja oli hävittänyt koivun taimet. Ankarimmin laidunnetuilla hakamailla säilyi vain leppä.

Mitä voimaperäisemmin ihminen metsää hoitaa ja mitä tarkemmin hän käyttää hyväkseen sen tuottaman biomassan, sitä kauempana metsä on luonnontilasta. Kauimpana luonnontilasta oltiin kaskikaudella, jolloin ihminen kaskesi ja laidunsi metsiä sekä keräsi talvirehuksi ja kuivikkeiksi oksat ja pienet puut. Asutus oli silloin Suomessa nykyistä huomattavasti tasaisemmin jakautunut, ja vain syrjäseutujen karuimmat alueet jäivät metsänkäytön ulkopuolelle, mutta sinnekin ulottui tervanpoltto ja järeiden sahapuiden poiminta. Viime vuosisadan puolivälissä luonnontilaisia metsiä oli vain osassa Lappia sekä kitumaakalliolla ja soilla.

Metsien käyttö nykyisin

Metsäpalot ja alkeelliseen maatalouteen perustuva metsän käyttö eivät enää vaikuta Suomessa metsäekosysteemien tilaan. Nykyisin poistetaan uudistushakkuilla vanhat puustot, jotka luonnontilassa ilman metsäpaloa vähitellen kuolisivat antaakseen tilaa uusille puille, ja harvennushakkuilla otetaan talteen valtaosa luonnontilaisissa metsissä metsäpalojen välisinä aikoina kuolevista puista. Luonnonpoistuma onkin viime vuosikymmeninä ollut metsissämme harvennushakkuiden ansiosta hyvin pieni, vain muutamia prosentteja hakkuupoistumasta.

Maamme nykyisen metsäkuvan ovat muovanneet pääosin puun teollinen ja kotitarvekäyttö. Vain noin viidennes maamme metsistä on viljeltyjä, mutta viljelymetsienkin puista huomattava osa on syntynyt luontaisesti. Nykyisin suositaan metsien luontaista uudistamista aina kun se on mahdollista. Myös viljelytaimikoihin pyritään taimikonhoitovaiheessa jättämään luontaisesti syntyneitä taimia ja ohjaamaan metsien kehitystä sekametsiksi.

Metsien käyttö ja terveys

Metsien käyttö yleensä parantaa metsien terveydentilaa, sillä ihmisen edun mukaista on poistaa metsistä heikot puut ja estää jo ennakolta puiden kunnon huononeminen. Tällä vuosisadalla metsähygienia onkin hakkuilla pidetty hyvänä, mutta viime vuosina se on selvästi heikentynyt harvennushakkuiden puutteen ja vanhojen metsien runsastumisen myötä.

Metsän käyttö voi myös heikentää puuston terveydentilaa. Koneellinen puunkorjuu vioittaa osaa kasvamaan jätetyistä puista ja metsään jätetty puutavara edistää tuhohyönteisten lisääntymistä.

Hakkuiden oikealla ajoittamisella voidaan myös puulajirakennetta ohjata saasteita paremmin kestäviksi sekametsiksi.

1.2 Ilman laatu Suomessa

Suomessa yleisimmin käytettyjä energialähteitä ovat öljy ja kivihiili. Viime vuosikymmenien aikana ydinvoima, kivihiili, maakaasu ja turve ovat osittain korvanneet öljyn, jonka osuus energiankulutuksesta oli vielä 1970-luvun alussa reilut 50 %, mutta on nykyään enää noin 30 %.

Tärkeimpiä saastepäästöjä ovat rikin ja typen oksidit sekä hiukkaset, hiilivedyt, häkä ja hiilidioksidi, joita syntyy lähinnä fossiilisten polttoaineiden käytöstä ja teollisuusprosesseista. Happamoitumisen kannalta keskeisiä

ovat rikin ja typen oksidit (rikkidioksidi SO_2, typpimonoksidi NO ja typpidioksidi NO_2) sekä emäksiset päästöt. Saasteita poistuu ilmasta esimerkiksi maahan ja kasvillisuuteen laskeuman muodossa.

Rikkilaskeuma

Suomen rikkilaskeumasta noin kolmannes on peräisin omista päästöistä, loput kulkeutuvat maan rajojen ulkopuolelta (kuva 3). Valtioneuvoston päätöksessä ilman laadun ohjearvoista vuodelta 1984 on asetettu tavoitteeksi, ettei rikkilaskeuma laajoilla maa- ja metsätalousalueilla tai luonnonsuojelun kannalta merkityksellisillä alueilla saisi ylittää 0,5 g/m^2/v eli 5 kg/ha/v.

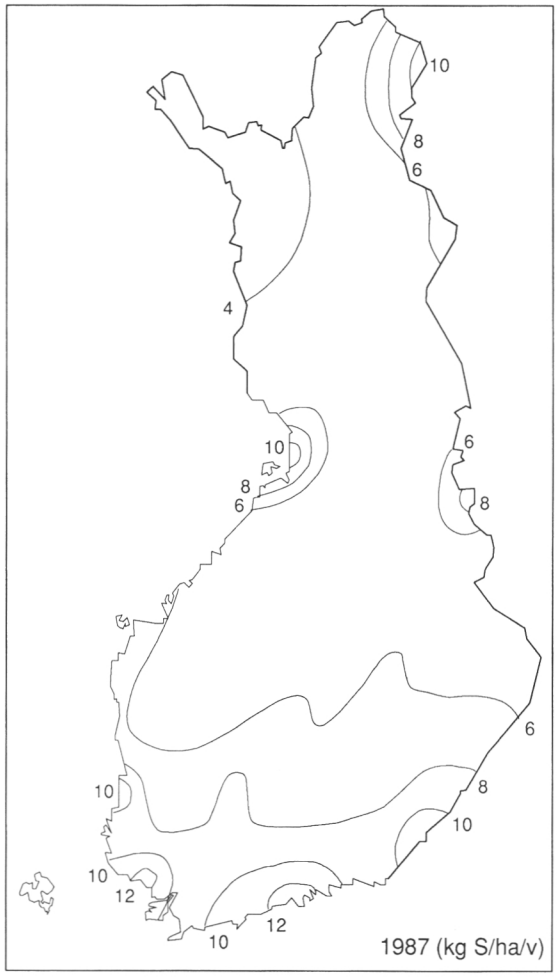
Suuren energiankulutuksen takia Suomen rikkipäästöt kasvoivat voimakkaasti aina 1970-luvulle saakka (kuva 4). Tämän jälkeen tapahtuneiden energiataloudellisten muutosten ja päästörajoitusten myötä ne ovat vähentyneet huomattavasti. Suomen rikkidioksidipäästöt olivat vuonna 1989 yhteensä noin 240 000 tonnia, ja niiden odotetaan pienenevän edelleen. Nykyisistä rikkidioksidipäästöistä lähes 80 % on peräisin energian tuotannosta, loput 20 % lähinnä teollisuudesta. Sen sijaan liikenne ei ole merkittävä rikkilähde.

Typpilaskeuma

Suomessa typen oksidipäästöistä peräisin olevasta typpilaskeumasta (kuva 5) yli 80 % kantautuu maan rajojen ulkopuolelta. Yli puolet typen oksidien päästöistä aiheuttaa liikennne, loput lähinnä energiantuotanto, ja vain pienen osan teollisuus. Typen oksidien päästöissä ei ole tapahtunut eikä ole odotettavissa yhtä selvää vähenemistä kuin rikkipäästöissä. Vuonna 1988 typpidioksidipäästöt olivat lähes 280 000 tonnia, mutta seuraavan kymmenvuotiskauden kuluessa päästöjen ennustetaan vielä nousevan. Pitkällä tähtäyksellä typpioksidien päästöjä pyritään kuitenkin alentamaan.

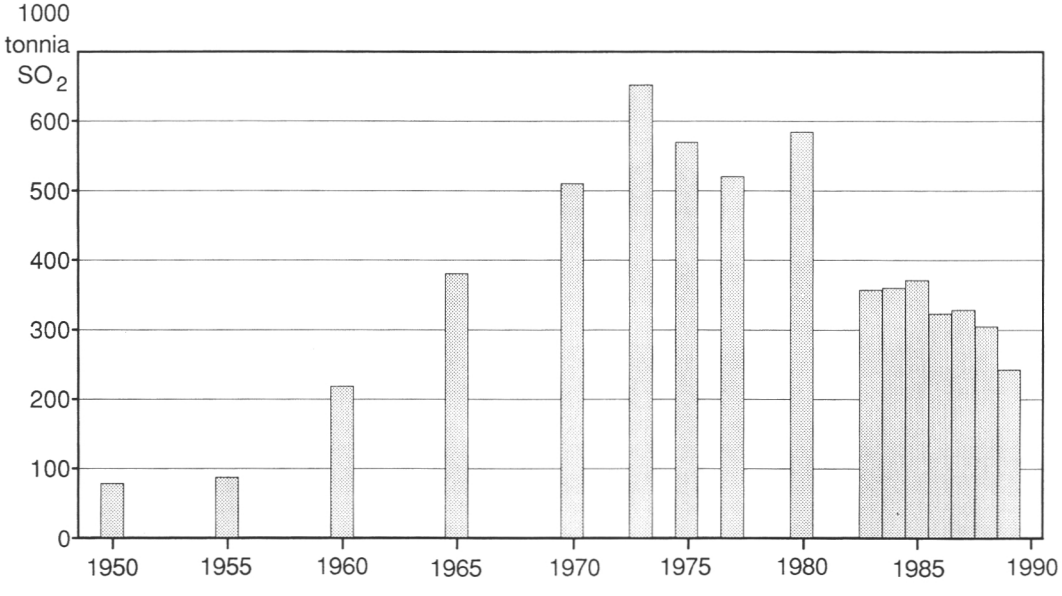
Emäskationilaskeuma

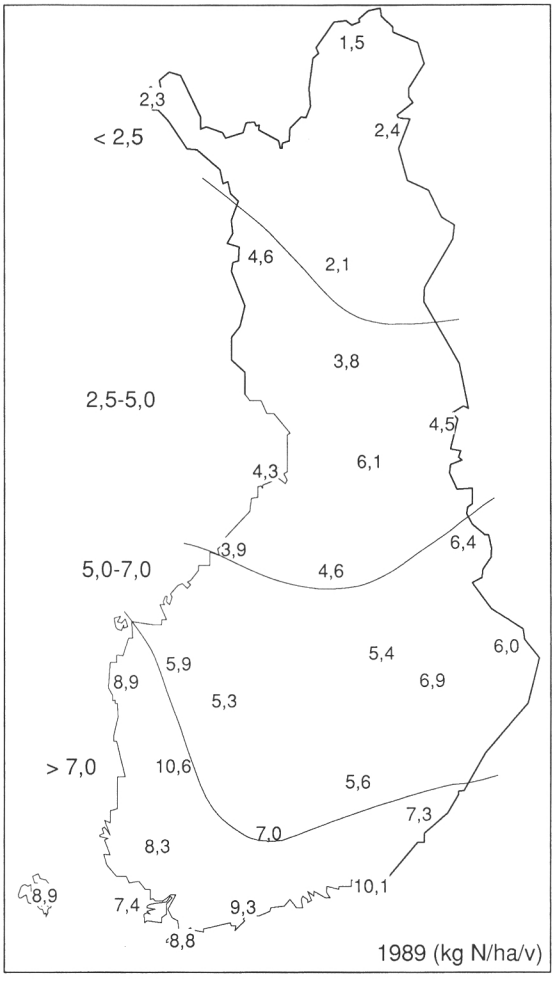
Happamoittavien aineiden lisäksi ilmassa on myös emäksisiä, esimerkiksi lentotuhkasta peräisin olevia hiukkasia. Sadeveden mukana tulevassa laskeumassa onkin huomattavasti ns. emäskationeja, joita ovat esimerkiksi kalium (K^+), kalsium (Ca^{2+}) ja magnesium (Mg^{2+}). Vetyionilaskeumaan verrattuna emäskationilaskeumaa on eniten Kaakkois-Suomessa ja vähiten Lapissa (kuva 6). Kaakkois-Suomi kuuluukin Viron palavankiven päästöjen vaikutusalueeseen. Karja- ja turkistalousalueilla tyypillisenä esiintyvästä ammoniumista ks. tarkemmin *Typpilaskeuman vaikutukset turkistarhojen lähimetsissä*, s. 170.



Kuva 3. Rikkilaskeuma Suomessa vuonna 1987 Ilmatieteen laitoksen mallilaskelmien perusteella.

Kuva 4. Suomen rikkipäästöt rikkidioksidiksi laskettuna vuosina 1950–89. Lähteet: Ympäristöministeriö, Kauppa- ja teollisuusministeriö.



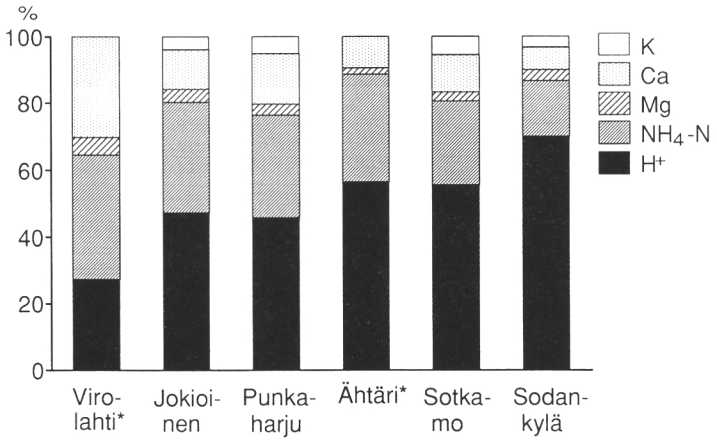


Kuva 5. Kokonaistypen laskeuma vuonna 1989 Vesi- ja ympäristöhallituksen mittausten perusteella.

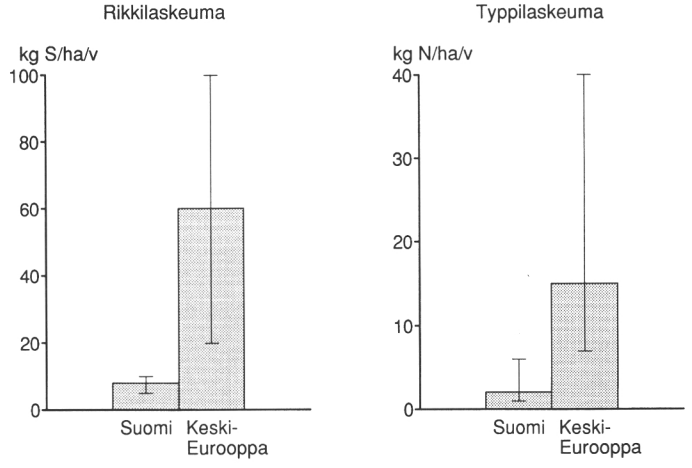
Ilmansaasteet ja laskeuma

Kaasumaiset rikki- ja typpiyhdisteet säilyvät ilmakehässä yleensä korkeintaan muutaman vuorokauden. Tänä aikana ne kulkeutuvat ilmavirtojen mukana, laimenevat vähitellen ja poistuvat ilmasta. Ilmakehässä ollessaan ja kulkeutuessaan useat ilmansaasteet muuttavat kemiallista koostumustaan. Rikkidioksidi hapettuu sulfaatiksi (SO_4) ja typpimonoksidi typpidioksidiksi. Nämä voivat reagoida edelleen muiden ilman aineosien kanssa, jolloin muodostuu mm. kasvillisuudelle haitallista rikki- ja typpihappoa (H_2SO_4, HNO_3).

Lisäksi esimerkiksi typpidioksidi hajoaa auringonsäteiden vaikutuksesta. Muun muassa tämän reaktion yhteydessä syntyy otsonia (O_3). Otsoni säätelee typen oksidien lisäksi myös muiden ilmassa esiintyvien yhdisteiden muodostumista, esimerkiksi veteen liuenneen rikkidioksidin hapettumista rikkihapoksi. Saastuneessa ilmassa onkin yleensä suhteellisen paljon otsonia. Suomessa rikki- ja typpilaskeumat ovat moniin muihin Euroopan maihin verrat-



Kuva 6. Tärkeimpien kationien suhteelliset osuudet laskeumassa Ilmatieteen laitoksen mittauksiin perustuen. Kaliumia ei mitattu Virolahdella eikä Ähtärissä (*).

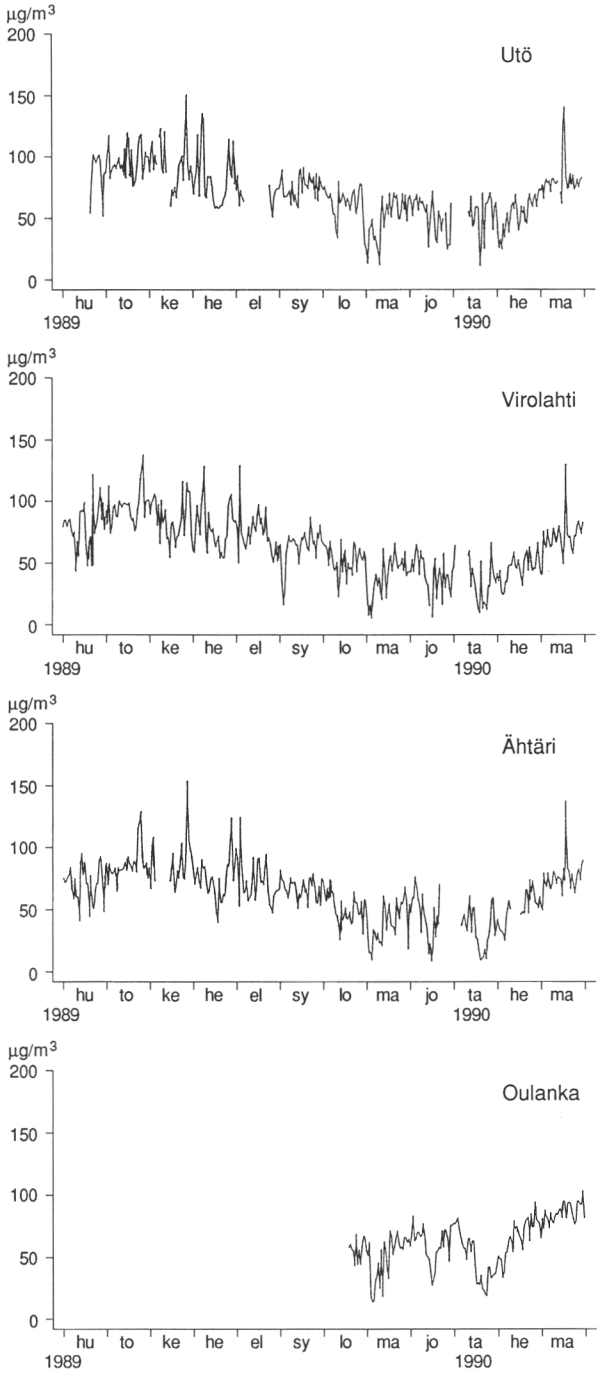


Kuva 7. Rikki- ja typpilaskeumatasot Suomessa ja Keski-Euroopassa. Pylväät osoittavat keskimääräiset tasot ja janat vaihteluvälit. Lähteet: EMEP, Vesi- ja ympäristöhallitus.

tuna kuitenkin melko pieniä (kuva 7).

Euroopan talouskomission (ECE) ehdottama kasveille kasvukauden aikana haitallisena pidettävä ns. kriittinen otsonipitoisuus on 50 µg/m^3. Tämänkaltaisten kriittisten rajojen määrääminen ei kuitenkaan ole yksiselitteistä, ja Suomen mittauksissa tämä kriittisen otsonipitoisuuden raja ylittyy hyvin usein (kuva 8).

Ilman saasteet joutuvat kasvillisuuteen ja maahan märkä- tai kuivalaskeumana. Märkälaskeuma muodostuu sadepisaroihin liuenneista aineista. Kuivalaskeuma, joka voi olla hiukkasmaista tai kaasumaista, kulkeutuu ilmavirtausten mukana kasvillisuuteen, veteen, maahan ja muille pinnoille. Kuivalaskeuman tarkka mittaaminen on osoittautunut hankalaksi, ja sen osuus kokonaislaskeumasta voi olla huomattava.



Kuva 8. Otsonipitoisuuden seitsemän tunnin keskiarvot (klo 9–16) mitattuna Utössä, Virolahdella, Ähtärissä ja Oulangalla Ilmatieteen laitoksen mittausten mukaan.

Ilmansaasteiden aiheuttamat ympäristöongelmat

Ilmansaasteiden ympäristöhaitat voivat johtua joko niiden kemiallisista ominaisuuksista, suurista määristä ja/tai pitkäaikaisesta altistuksesta. Suomessa on sekä paikallisia, ts. alueellisesti varsin rajoittuneita, että laajalle alueelle ulottuvia ilmansuojelu-ongelmia. Pahimmat paikalliset ongelmat aiheutuvat yleensä liikenteen päästöistä. Lisäksi mm. helposti laskeutuvien suurikokoisten hiukkasten (esim. pöly) ja erityisen reaktiivisten aineiden (esim. fluoridi-ioni) vaikutukset rajoittuvat selvimmin päästölähteiden lähiympäristöön.

Kun sateita ja sekoittavia ilmavirtauksia (erityisesti pystyvirtauksia) on vähän, monet ilmansaasteet kulkeutuvat pitkien matkojen, jopa satojen tai tuhansien kilometrien päähän päästölähteestä.

Aiheesta enemmän

Energiakomitean mietintö. Komiteanmietintö 1989:11.

Kauppi, P., Anttila, P., Karjalainen-Balk, L., Kenttämies, K., Kämäri, J. & Savolainen, I. (toim.). 1990. Happamoituminen Suomessa. HAPROn loppuraportti. YM:n Sarja A/1990. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto.

Ilmansuojelu Suomessa. 1989. Esite 14/1989. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto.

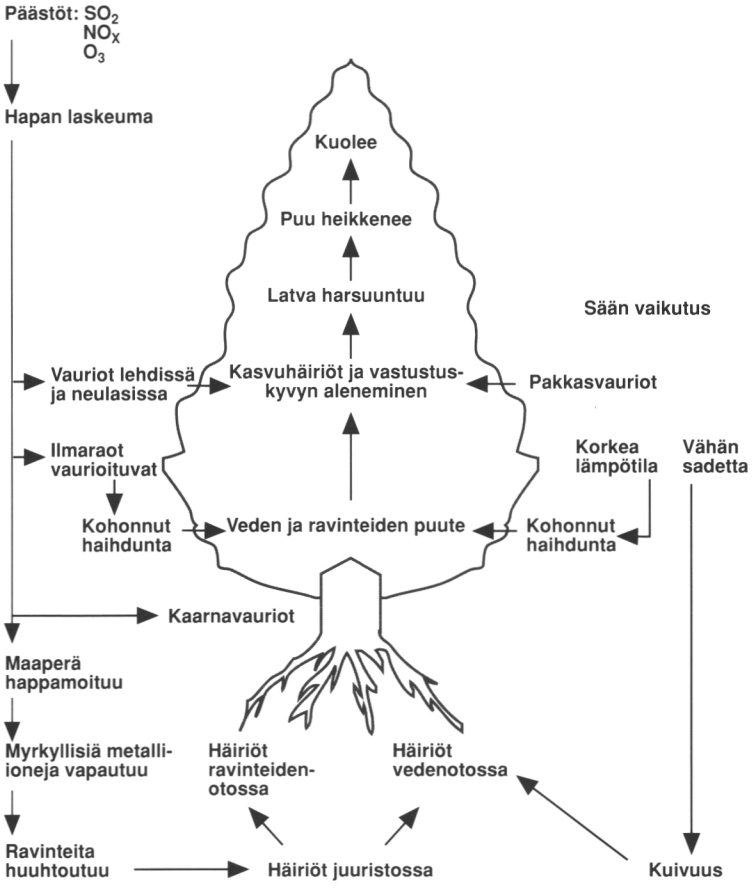
Ympäristökatsaus 1/1991. Päästöt ja ilman laatu. Ympäristötietokeskus.

1.3 Ilmansaasteet ja kasvillisuus

Ilmansaasteiden haitalliset vaikutukset metsien terveydentilaan, ja erityisesti niiden puuntuotantoon, lienevät ympäristön keskeisin ja huomioiduin uhka. Ilman laadun muutokset vaikuttavat kuitenkin kaikkiin maapallon ekosysteemeihin.

Ilmansaasteet vaikuttavat kasviyhdyskuntien rakenteeseen ja lajistoon. Jotkut lajit voivat kärsiä jo suhteellisen pienistä haitallisten aineiden laskeumista, toiset puolestaan voivat käyttää muilta lajeilta vapautuvan kasvutilan hyväkseen tai hyötyä laskeuman lannoittavasta vaikutuksesta. Ilmansaasteiden takia täysin ilman kasvillisuutta olevia alueita, "teollisuusaavikoita", tavataan pahojen saastelähteiden ympäristössä esimerkiksi Keski-Euroopassa ja Kuolan alueella suurten metallisulattojen ympäristössä.

Kasveille haitallisimpia ilmansaasteita ovat rikki, typpi, raskasmetallit, otsoni ja fluori. Ne haittaavat kasvien elintoimintoja tai vaurioittavat kasveja suoraan tai välillisesti esimerkiksi maaperää muuttamalla (kuvat 9 ja 10).



Kuva 9. Ilmansaasteet vaikuttavat kasvillisuuteen tunkeutumalla suoraan kasvin solukoihin ja välillisesti maaperän ja sen eliöiden kautta.

Ilmansaasteiden suorat vaikutukset

Vahvat hapot voivat syövyttää kasvien pintaa suojaavaa ns. kutikulakerrosta. Myös kasvin ilmarakojen toiminta voi häiriytyä. Ilmarakojen avautuminen ja sulkeutuminen on tarkkaan säädelty ja herkkä prosessi. Kosteassa ilmassa ilmaraot ovat auki ja kaasut pääsevät vaivattomasti lehtisolukkoon. Kohonnut ilmankosteus voikin altistaa kasvit typen ja rikin oksidien aiheuttamille vaurioille. Päästyään lehtisolukkoon typen ja rikin oksidit voivat liueta solunesteisiin muodostaen happoa, joka aiheuttaa soluvaurioita ja kasvinosien pysyviä muutoksia. Vaikka solut eivät kuolisikaan, niiden aineenvaihdunta saattaa häiriytyä.

Ilmansaasteiden suorat vaikutukset voimistuvat, jos kasvi on jo muutenkin altistunut erilaisille stressitekijöille, kuten kylmyydelle ja kuivuudelle.

Ilmansaasteiden välilliset vaikutukset

Maaperän happamoituminen lienee tunnetuin ilman saastumisen epäsuorista vaikutuksista. Happamoitumisen seurauksena kasveille tärkeitä emäsravinteita (esim. Mg, Ca,

K) huuhtoutuu maaperästä ja maahiukkasista vapautuu haitallista alumiinia ja raskasmetalleja. Tämä saattaa häiritä kasvien ravinnetasapainoa, jolloin kasvin vastustuskyky sienitauteja ja tuhohyönteisiä vastaan alenee.

Happamoituminen vaikuttaa myös maaperän pieneliöstöön, jolla on tärkeä tehtävä karikkeen (mm. kuolleiden kasvinosien) hajottajana takaisin kasveille käyttökelpoisiksi ravinteiksi. Happamoituminen voi myös heikentää kasvien elinvoimaisuutta vaurioittamalla mykorritsoja eli sienijuuria, joiden avulla sekä metsäpuut että monet muut kasvit ottavat maasta vettä ja ravinteita.

Rikki

Nykyisen käsityksen mukaan rikkiyhdisteet ovat kasveille haitallisimpia ilmansaasteita. Niiden vaikutuksia on myös eniten tutkittu. Rikki vaikuttaa kasveihin joko suoraan kaasumaisina yhdisteinä (rikkidioksidi SO_2) tai esimerkiksi lisäämällä maaperän happamuutta.

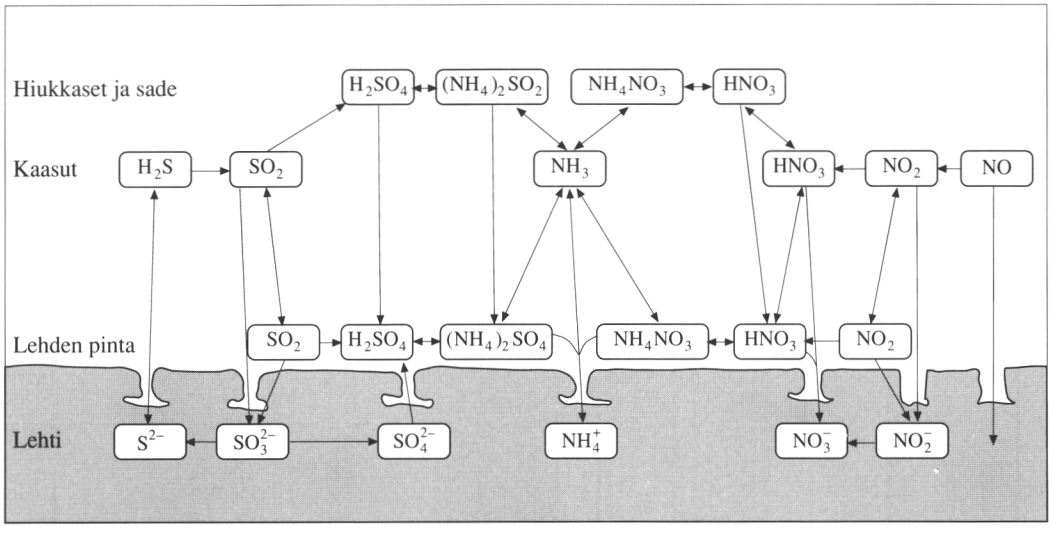
Rikki on kasveille myös välttämätön ravinne mm. valkuaisaineiden rakenneosana, eivätkä kasvit tule toimeen täysin rikittömällä kasvualustalla. Kasveja vaurioittavana pidetään kuitenkin jo vuosittaista n. 20 $\mu g/m^3$ ylittävää rikkidioksidipitoisuutta. Viime vuosikymmeninä on rikkipitoisten fossiilisten polttoaineiden runsas käyttö monin paikoin nostanut ilman ja sadeveden rikkipitoisuutta edellä mainittua arvoa suuremmiksi. Ilmakehän kohonnut hiilidioksidipitoisuus saattaa myös lisätä rikkidioksidin haitallisia vaikutuksia kasveihin.

Typpi

Typpi on tärkeä kasvinravinne. Metsämaassa on usein niukasti kasveille käyttökelpoista typpeä, minkä vuoksi sitä on käytetty lannoitteena puuston kasvun lisäämiseksi. Ilmassa typpeä on runsaasti, mutta kasvit eivät normaalisti pysty sitä käyttämään. Esimerkiksi leppä ja hernekasvit pystyvät sitomaan typpeä juurinystyräbakteeriensa avulla suoraan ilmasta. Erilaisissa reaktioissa, esimerkiksi orgaanisten aineiden hajotessa tai palaessa, syntyviä typpiyhdisteitä kasvit voivat sen sijaan käyttää hyväkseen. Liika liukoinen typpi häiritsee kuitenkin kasvien elintoimintoja.

Typen palamistuotteet, typpioksidit (NO_x), muodostavat auringon valon vaikutuksesta ns. fotokemiallisissa reaktioissa otsonia (O_3), joka on kasveille myrkyllistä jo pieninäkin pitoisuuksina. Yhdessä esiintyessään typen ja rikin oksidit myös vahvistavat toistensa haittavaikutuksia.

Liikenne, maatalous ja teollisuus ovat suurimmat typpilaskeuman lähteet. Suhteellisen vähäinenkin typpilaskeuma voi muuttaa kasvillisuutta siten, että kasvilajistossa yleistyvät alkuperäistä viljavamman kasvupaikan lajit.



Kuva 10. Esimerkki ilmansaasteiden reaktioista sekä lehden pinnan ja ympäröivän ilman välisistä rikki- ja typpivirroista. Hiukkaset laskeutuvat joko kuivina tai sadeveden mukana. Kaasut kulkeutuvat suoraan lehtiin tai imeytyvät ensin hiukkasiin.

Keski-Euroopassa mitatut jopa sadan kilon vuotuiset typpilaskeumat hehtaarille häiritsevät kasvien ja maaperän välistä tasapainoa.

Raskasmetallit

Erityisesti liikenteen päästöistä kertyy luontoon raskasmetalleja, mm. lyijyä ja kadmiumia. Metallinjalostusteollisuus tuottaa ilmaan mm. kupari-, rauta- ja kromiyhdisteitä. Jotkut metallit ovat kasveille pieninä määrinä elintärkeitä ns. hivenravinteita, mutta liian suuret määrät ovat myrkyllisiä.

Otsoni

Ilmakehän stratosfäärikerroksen yli 10 km:n korkeudella sijaitseva otsonivaippa suojaa eliöitä haitalliselta UV-säteilyltä, mutta maanpinnan läheisyydessä otsonilla voi olla kasveille selviä myrkkyvaikutuksia. Kasveille haitallisena pidetään kasvukaudella päiväsaikaan 50 $\mu g/m^3$ ylittäviä ilman otsonipitoisuuksia. Selkeimmät otsonivauriot metsäpuilla on kuvattu Kalifornian vuoristoissa, mutta viime aikoina on odotettu vaurioita ilmenevän myös pohjoisissa havumetsissä.

Otsoni on kemiallisesti hyvin aktiivinen kaasu. Joutuessaan kasvisoluun se voi häiritä ilmarakojen toimintaa ja aiheuttaa siten ongelmia kasvin vesitaloudelle. Se vahingoittaa myös solukalvoja muuttamalla kalvojen rasvamolekyylien sidoksia. Viherhiukkaset rappeutuvat herkästi jo suhteellisen alhaisissa otsonipitoisuuksissa, ja siten kasvin yhteyttämiskyky heikkenee. Akuutit otsonivauriot ilmenevät kasvien lehdissä pieninä (0,1–1 mm) vaaleina tai ruskeina läikkinä ilmarakojen kohdalla.

Otsonin osuutta Suomen metsävaurioihin ei ole vielä varmuudella voitu osoittaa. Puissa ilmeneviä oireita tutkitaan kuitenkin entistä perusteellisemmin ja monipuolisemmin, jolloin myös otsonin osuus mahdollisiin metsävaurioihin selvinnee.

Aiheesta enemmän

Kärenlampi, L. 1990. Maaekosysteemit vaarassa — uhkat ilmakehästä. Kuopion Luonnon Ystäväin Yhdistys r.y. 111 s.

1.4 Metsämaa

Suomen maaperän pinnanmuodot ja rakenne ovat pääasiassa mannerjäätikön ja sen sulamisvesien toiminnan aikaansaannosta. Jääkauden jälkeisestä paljastumisestaan lähtien maaperän pintaosa on vähitellen muuttunut, josta on osoituksena maan pintakerrokseen kehittynyt maannos. Tämä hyvin hitaasti etenevä luontainen muutosilmiö happamoittaa vähitellen pintamaata ja heikentää sen ravinteisuutta. Metsämaa on siten luonnontilassakin jatkuvien muutosten alainen, vaikka maa on yksi metsäekosysteemin vakaimmista osista (kuva 11).

Maaperä koostuu maalajeista, jotka ovat syntyneet eri aikoina ja erilaisissa luonnonoloissa joko kallioperän rapautumistuotteista tai eloperäisistä aineksista. Moreenimaat, jotka sisältävät kaikkia raekokoja sekaisin, ovat meillä vallitsevia.

Metsien kasvuedellytykset moreenimailla vaihtelevat suuresti maaston pinnanmuotojen sekä maan kivisyyden ja tiiviyden mukaan. Lajittuneiden maiden ominaisuudet määräytyvät suureksi osaksi yhden tai kahden valtalajitteen perusteella. Karkearakeiset lajittuneet maat ovat pääsääntöisesti kuivia kankaita; hienorakeiset maat taas on suureksi osaksi raivattu maatalouden käyttöön.

Suokasvillisuuden maatuneista jäännöksistä syntyneet turvemaat peittävät kolmanneksen maa-alasta, eniten niitä on Pohjanmaalla, Keski-Lapissa ja Kainuussa. Turpeella on kyky vastustaa mm. happamuuden muutoksia, joten hapan laskeuma ei ole turvemailla samanlainen riskitekijä kuin kangasmailla.

Metsämaan viljavuus

Metsien kasvuedellytykset määräytyvät ilmasto- ja maaperätekijöiden yhteisvaikutuksesta. Nämä kasvupaikkatekijät liittyvät usein saumattomasti toisiinsa, sillä esimerkiksi lämpötila ja sademäärä vaikuttavat puiden kasvuun sekä ilman että maan välityksellä.

Metsämaiden viljavuus määräytyy pääpiirtein siten, että Pohjois-Suomessa ilmastolliset tekijät, lähinnä alhainen lämpötila, rajoittavat selvimmin metsien kasvua ja kehitystä. Sen sijaan Etelä-Suomessa maaperälliset tekijät, kuten ravinteiden, erityisesti typen, niukkuus moreenimailla ja sen lisäksi veden puute karkearakeisilla lajittuneilla mailla ovat usein minimitekijöitä. Maan viljavuus riippuu siten ratkaisevasti hienosta maa-aineksesta, joka



Kuva 11. Suomessa vallitseva maannostyyppi on podsolimaannos.

on ravinteiden pääasiallinen lähde. Sen lisäksi hieno maa-aines säätelee veden varastoitumista maahan.

Metsämaan viljavuuden alueellisesta vaihtelusta saadaan käsitys eri kasvupaikkatyyppien esiintymisen perusteella. Esimerkiksi Hämeen ja Savon lehtokeskuksissa viljavat kasvupaikat ovat yleisempiä kuin muualla, ja vedenjakajilla ja harjualueilla esiintyy keskimääräistä runsaammin karuja kasvupaikkoja.

Luontainen ja ihmisen aiheuttama maan happamoituminen

Luontaisten tekijöiden lisäksi myös ihmisen monet toimenpiteet, kuten kaskeaminen, puunkorjuu, kulotus, maanmuokkaus, puulajivalinta sekä saasteiden päästöt, vaikuttavat maan viljavuuteen. Esimerkiksi kaskialoja on arvioitu olleen Suomessa viime vuosisadalla yli 4 milj. hehtaaria, ja Mikkelin läänissä peräti yli 60 % kasvullisen metsämaan pinta-alasta. Kaskeaminen ja varsinkin siihen liittynyt lepän ja koivun yleistyminen on parantanut maan ominaisuuksia havumetsiin verrattuna, mutta kaskikauden aiheuttamat piirteet ovat nyt väistymässä metsistämme.

Suosimalla koivua sekapuuna voidaan vähentää humuksen happamuutta ja siten edistää maan biologista aktiivisuutta ja ravinteiden kiertoa. Toisaalta puunkorjuu ja sen aiheuttama ravinteiden menetys, joko suoranaisesti korjattavan puutavaran mukana tai ravinteiden lisääntyneen huuhtoutumisen vuoksi, edistää maan happamoitumista.

Ilman epäpuhtauksien aiheuttaman happaman kuormituksen seurauksena arvioidaankin ravinteiden huuhtoutumisen ja maan happamoitumisen voimistuvan. Suhteellisen alhaisetkaan pH-arvot eivät sinänsä ole vahingollisia kasveille, sillä metsäkasvillisuus on sopeutunut happamaan maaperään ja osaltaan ylläpitää maan happamuutta.

Maan happamuudella on kuitenkin hyvin suuri merkitys siksi, että se vaikuttaa niin ravinteiden saatavuuteen kuin myös kasveille myrkyllisten aineiden liukenemiseen ja saostumiseen maassa. Metsien kannalta maan happamoitumisen keskeisin merkitys onkin sen aiheuttamissa muutoksissa ravinteiden saatavuuteen.

Maan pintakerrosten happamuusaste riippuu maan puskurikyvystä eli kivennäisaineksen ja orgaanisen aineen ominaisuuksista vastustaa pH:n muutoksia. Heikoin puskurikyky on lajittuneilla, karkearakeisilla ja vähähumuksisilla mailla. Happamasta laskeumasta aiheutuvia muutoksia on vaikea erottaa metsämaassa joko luontaisesti tapahtuvasta tai metsien hyväksikäytöstä johtuvasta kehityksestä.

Metsämaiden happamoitumista on tarkasteltu luvussa *3.3 Metsämaan happamoitumistilanne Suomessa,* s. 54.

Haavisto, M. (toim.) 1983. Maaperäkartan käyttöopas. Geologinen tutkimuslaitos. Opas 10. 80 s.
Mälkönen, E. 1991. Metsämaa ja sen hoitaminen. Tapion taskukirja, s. 134–145. Kustannusosakeyhtiö Metsälehti, Helsinki.
Okko, V. 1964. Maaperä. Teoksessa: Rankama, K. (toim.). Suomen geologia, s. 239–332. Kirjayhtymä.
Tamminen, P. 1990. Metsämaiden alueellinen viljavuus. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 370: 61–72.
Tamminen, P. & Mälkönen, E. 1986. Kangasmaiden herkkyys happamoitumiselle. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 210. 25 s.

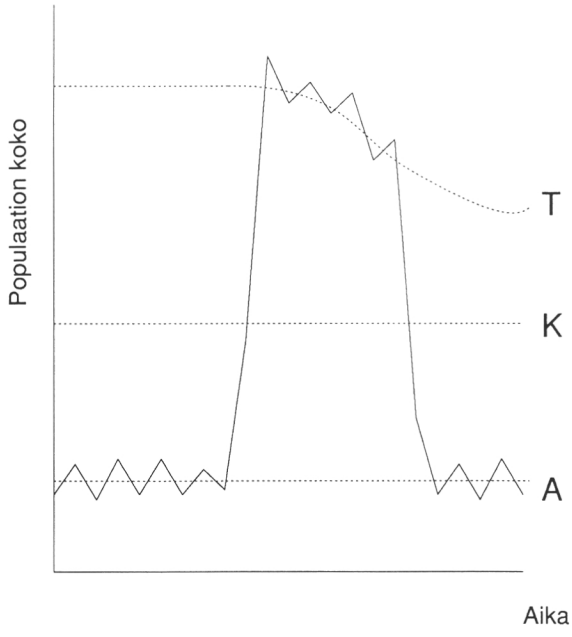
1.5 Metsien sieni- ja eläintuhot

Kasvitautien esiintyminen ja voimakkuus ovat riippuvaisia sekä isäntäkasvista, ympäristöstä että taudinaiheuttajasta. Taudin puhkeaminen edellyttää, että aggressiivinen taudinaiheuttaja pystyy tehokkaasti tartuttamaan alttiin isäntäkasvin. Tartuttamisen eli infektion edellytyksenä ovat puolestaan lisääntymisyksiköiden leviämiselle ja itämiselle suotuisat olot. Mm. perimä, ilmasto- ja sääolot sekä maaperän happi-, kosteus- ja ravinnesuhteet voivat lisätä isäntäkasvin alttiutta taudille.

Ihmisen toimenpiteet voivat monin tavoin vaikuttaa tautien esiintymiseen. Esimerkiksi viljelymateriaalin alkuperän valinta, korjuutoimet, lannoitus ym. voivat vähentää tai lisätä tautiriskiä. Ihmisen vaikutus voidaankin nähdä uutena isäntäkasvi/taudinaiheuttaja/ympäristö-suhteeseen vaikuttavana tekijänä.

Eläimistä metsätuholaisena pidetään sellaista lajia, joka aiheuttaa taloudellista vahinkoa metsissä. Puustoa vahingoittava laji voi äkillisesti runsastua mm. abioottisten tekijöiden (sää, kuivuus, kylmyys jne.) nopeiden muutosten, populaation yksilöiden perimän äkillisen muutoksen, luontaisten vihollisten kuten petojen, loisten ja taudinaiheuttajien vähenemisen, sekä ravintokasvien laadullisten tai määrällisten muutosten tai puolustuskyvyn heikkenemisen seurauksena (kuva 12). Runsaana esiintyessään eräät tuholaiset voivat murtaa terveidenkin puiden puolustuksen.

Metsätuhohyönteiset aiheuttavat vahinkoa syömällä ravintokasvistaan joko juuria, runkoa, lehtiä, neulasia, versoja, kukkia tai siemeniä, tai imemällä siitä nesteitä. Tuhonaiheuttajana merkittävien lajien osuus koko metsän eliökunnasta on hyvin pieni verrattuna vaikutukseltaan harmittomien tai hyödyllisten lajien määrään.



Kuva 12. Ruskomäntypistiäisen runsauden muutokset kaavamaisesti esitettynä tietyllä paikalla. Luontaiset vihollliset säätelevät pistiäisen populaatiokokoa lajin tiheyden ollessa alhainen (A). Pistiäinen runsastuu nopeasti tuhotasolle (T) tiheyden noustessa syystä tai toisesta yli kynnystason (K); luontaiset vihollliset eivät enää kykene pitämään tuholaiskantaa alhaisena. Jonkin ajan kuluttua pistiäisen populaatiokoko laskee nopeasti vihollisten runsastuttua ja ravinnon vähennyttyä. Mäntypistiäistuho voi kestää muutamia vuosia.

Suomen metsissä esiintyy moniin muihin maihin verrattuna suhteellisen vähän eläinten aiheuttamia tuhoja. Nuorten, tasaikäisten, yhtä puulajia kasvavien metsien runsastuminen samoin kuin vanhojen aarnimetsien ja luonnonkulojen väheneminen on johtanut eräiden hyönteislajien taantumiseen.

Metsissä tapahtuu myös erilaisia abioottisia tuhoja kuten esimerkiksi myrsky- ja lumituhoja. Ne vaikuttavat usein myös välillisesti hyönteisten tai sienien esiintymismahdollisuuksiin muuttamalla metsäekosysteemiä sekä heikentämällä puiden elinvoimaisuutta. Abioottisia tuhoja voidaan usein torjua metsien hoidolla.

Suomessa esiintyviä tuholaisia on esitelty tarkemmin luvussa 5.1 *Metsiemme tärkeimpiä sienitauteja ja tuholaisia,* s. 127.

Ihmisen toiminnan vaikutus hyönteis- ja sienituhoihin

Puiden kasvukunnosta huolehtiminen esimerkiksi oikeaaikaisilla harvennuksilla on eräs tärkeimpiä tuhoja vähentäviä toimenpiteitä. Metsien hoidossa tulisi huolehtia siitä, että kullekin kasvupaikalle valitaan oikea ja alkuperältään sopiva puulaji, ja että sairaat puut poistetaan tautia levittämästä. Korjuuvaurioiden välttäminen sekä puutavaran korjaaminen pois metsistä ennen tuhohyönteisten parveiluaikaa ovat tärkeitä torjuntatoimenpiteitä. Puiden ravinnetasapainosta ja vesitaloudesta huolehtiminen tarvittaessa lannoituksilla tai ojituksilla parantaa myös puiden kestävyyttä tuhoja vastaan.

Ilmansaasteet vaikuttavat yhtä aikaa sekä puihin että tuholaisiin ja myös näiden luontaisiin vihollisiin. Isäntäkasvin heikentyminen voi merkittävästi lisätä joidenkin tuholaisten lisääntymismahdollisuuksia. Sieni- tai hyönteistuhojen yleistymistä ilmansaasteiden takia ei kuitenkaan voida pitää yleisenä sääntönä, vaan eri tekijöillä voi olla hyvin monimutkaisia vuorovaikutussuhteita. Nämä riippuvat puiden kunnosta, stressitekijöiden voimakkuudesta ja kestosta, tuholaislajin käyttäytymisestä ja sen kannan suuruudesta. Eri stressitekijöiden suhdetta on pyritty kuvaamaan luokittelemalla ne altistaviin, myötävaikuttaviin tai laukaiseviin. Vaikka yksikin riittävän voimakas stressi voi merkittävästi heikentää puiden kuntoa, useimmiten on kyse "kompleksioireesta", jossa epäpuhtaudet ovat yksi monesta vaikuttavasta tekijästä.

Ilmansaasteet ja sienitaudit

Puiden heikentyminen ilmansaasteiden joko suorien tai epäsuorien vaikutusten takia lisää sellaisia taudinaiheuttajia, jotka pystyvät elämään sekä elävässä että kuolleessa kasvisolukossa (ns. fakultatiiviset parasiitit). Ehdottomat loiset (vain elävissä kasveissa elävät) kuten esimerkiksi ruostesieniin kuuluvat tervasroso, versoruoste ja kuusen suopursuruoste yleensä vähenevät ainakin suurissa ilmansaastepitoisuuksissa.

Ilmansaasteiden vaikutuksesta voivat lisääntyä lahottajasienet ja tietyt neulaskaristesienet. Pienienkin rikkidioksidipitoisuuksien on laboratoriossa havaittu lisäävän juurikäävän rihmaston kasvua, kun taas otsonikaasutukset ovat puolestaan vähentäneet kasvua ja itiöiden infektiokykyä. Toisaalta mm. otsonivaurioista kärsineiden mäntyjen puuaineen ja juurten on havaittu olevan hyvin alttiita juurikääpätartunnalle. Juurikääpä ja mesisieni ovat olleet yleisiä taudinaiheuttajia teollisuusalueiden metsissä mm. Puolassa.

Rhizosphaera kalkhoffii-karistesienen on kokeellisesti osoitettu runsastuneen punamännyllä Japanissa rikkidioksin lisääntyessä. Tätä sientä samoin kuin *Lophodermium*-lajeja on ollut paljon mm. Saksan kuusikoissa, ja niiden merkityksestä on siellä keskusteltu runsaasti. Ilmeisesti ne samoin kuin useat muutkin tavallisesti vain heikosti patogeeniset neulassienet runsastuvat, kun puihin vaikuttaa mikä tahansa ylimääräinen stressitekijä.

Versosurman eli versosyövän ja ilmansaasteiden yhteyksistä ei toistaiseksi ole varmoja todisteita. Kokeissa hapansade- tai rikkidioksidikäsittelyt eivät yleensä ole lisänneet tautia. Suomen kaupunki-ilmassa tai Saksassa esiintyvien pitoisuuksien mukainen rikkidioksidikäsittely on jopa vähentänyt tautia, koska sieni-itiöitä on ollut vähän. Ilmansaasteiden pitkäaikaisesta vaikutuksesta taudinalttiuteen esimerkiksi puille käyttökelpoisten ravinteiden vähenemisen kautta ei kuitenkaan ole tutkimuksia.

Ilmansaasteet ja tuhohyönteiset

Tuhohyönteiset lisääntyvät usein heikentyneissä puissa. Sen on arveltu liittyvän puissa tapahtuneisiin biokemiallisiin ja fysiologisiin muutoksiin. Ympäristön ja puun heikentymisen vaikutusta hyönteistuhoihin on usein vaikea eritellä, koska esimerkiksi kuivat ja lämpimät kaudet suosivat hyönteisiä mutta heikentävät samalla puita.

Lisäksi puun stressin määritteleminen on vaikeaa. Sitä on yritetty kuvata erilaisin tunnuksin, jotka liittyvät puun vesitalouteen, fotosynteesiin tai liukoisen typen, aminohappojen ja puolustusyhdisteiden määrään. Puulajien välillä on lisäksi suuria eroja stressin ilmenemisessä, ja stressi vaikuttaa edelleen eri tavoin äkämänmuodostajiin, pureva- ja imeväsuisiin hyönteisiin, miinaajiin ja nilansyöjiin.

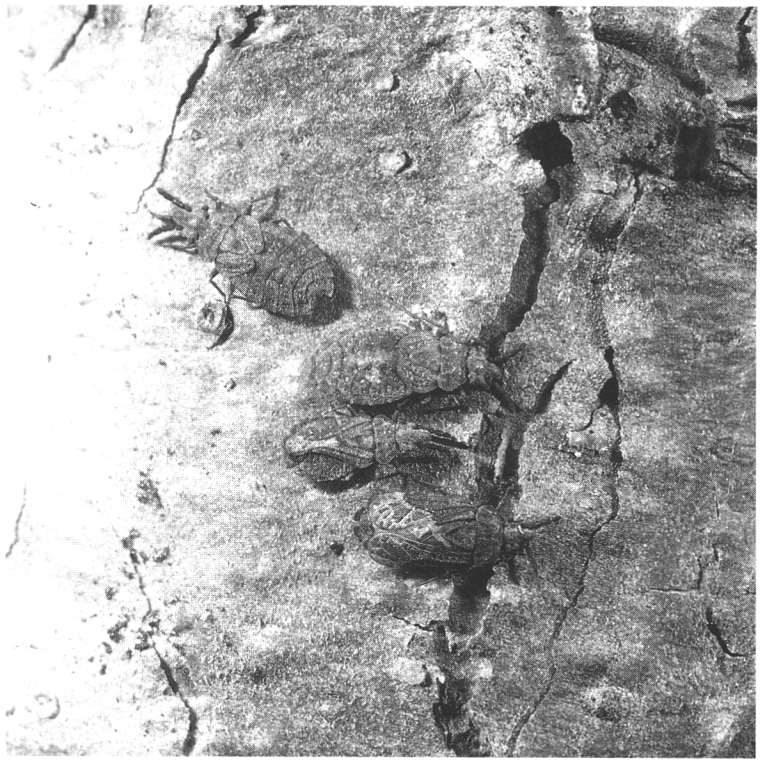
Äkämiä muodostavat hyönteiset suosivat suuria, hyvin kasvaneita kasvisolukoita, koska muninta ja toukkien kasvaminen onnistuu niissä parhaiten. Ympäristön aiheuttama stressi taas vähentää solujen, silmujen ja versojen kasvua, joten ilmansaasteet yleensä vähentävät äkämänmuodostajia.

Suurin osa saasteiden ja hyönteisten välisistä tutkimuksista käsittelee purevasuisia hyönteisiä kuten perhosja pistiäistoukkia. Useimmiten puun stressi on vaikuttanut näiden hyönteisten toukkiin kielteisesti. Liukoisen typen lisääntyminen on toukille edullista, mutta neulasten puolustusyhdisteiden pitoisuuksien nousu on taas niille haitallista; kokonaisvaikutus on kuitenkin epäedullinen.

Kasvisolukkojen sisällä elävät miinaajat ilmeisesti hyötyvät jonkin verran ilmansaasteista. Neulasten miinaajat kykenevät välttämään pihkatiehyeiden terpeeniyhdisteet elämällä neulasen mesofyllisolukossa. Näin ne pystyvät hyötymään isäntäkasvin typpipitoisuuden noususta ja välttävät sen haitalliset vaikutukset paremmin kuin koko neulassolukkoa syövät hyönteiset.

Imeväsuiset hyönteiset, esimerkiksi kirvat ja punalatikat (kuva 13), hyötyvät tutkimusten mukaan enemmän kuin muut hyönteiset ilmansaasteista ja isäntäkasvin stressistä. Kasvinesteitä imevien hyönteisten määrät kasvavat yleensä, jos niillä on runsasravinteista ja typpipitoista ravintoa. Lisäksi haitallisia yhdisteitä on ilmeisesti vähemmän kasvinesteissä kuin esimerkiksi lehtisolukossa. Kasvin stressin aiheuttama liukoisen typen lisäys näkyykin erityisen hyvin kirvojen koon ja populaatiotiheyden äkillisenä kasvuna.

Monille nilaa syöville hyönteisille, erityisesti kaarnakuoriaisille, puun heikentyminen ja puolustuskyvyn murtuminen on elinehto. Kokeellisesti on osoitettu, että heikentyneissä puissa kaarnakuoriaisten iskeytymiskyky ja jälkeläisten tuotto ovat suurempia kuin kontrollipuissa. Kaarnakuoriaisilla isäntäpuun stressin tutkiminen on erityisen vaikeaa, koska iskeymä onnistuu vain, jos isäntäpuun koko, hyönteispopulaation suuruus sekä feromonien ja sinistäjäsienien määrä ja laatu täyttävät iskeytymisen vaatimukset.



Kuva 13. Punalatikka on runsastunut nuorissa männiköissä. Sitä tavataan erityisen runsaasti teollisuuslaitosten ympäristössä ja teiden varsilla. Valokuva: Kari Heliövaara.

Aiheesta enemmän

Metsänterveysopas 1988. Metsätuhot ja niiden torjunta. Samerka Oy, Helsinki. 168 s.

Nevalainen, S. & Liukkonen, K.M.H. 1988. Ilman epäpuhtauksien vaikutus bioottisiin metsätuhoihin. Kirjallisuuskatsaus. Folia Forestalia 716. 25 s.

Nuorteva, M. 1982. Metsätuholaiset. Kirjayhtymä, Rauma. 91 s.

2. Metsien kasvu

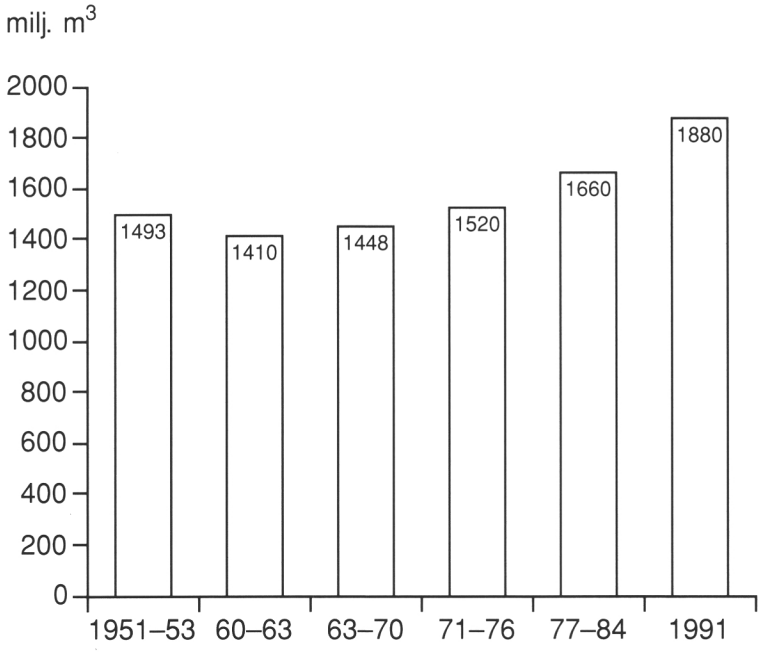
2.1 Metsävarat ja metsien kasvu

Suomen metsävarat ja metsien kasvu on arvioitu säännöllisin väliajoin 1920-luvulta lähtien valtakunnan metsien inventoinneissa (VMI). Nämä pitkät aikasarjat antavat mahdollisuuden arvioida metsissä tapahtuneita muutoksia. Samalla ne tarjoavat korvaamattoman aineiston selvitettäessä ympäristömuutosten vaikutuksia metsäekosysteemiin, sillä puiden kasvu heijastaa niiden elinvoimaisuutta. Ns. kasvuindeksejä, jotka ilmaisevat kasvun tason suhteellisen muutoksen, on niin ikään laadittu valtakunnan metsien inventointien aineistojen perusteella.

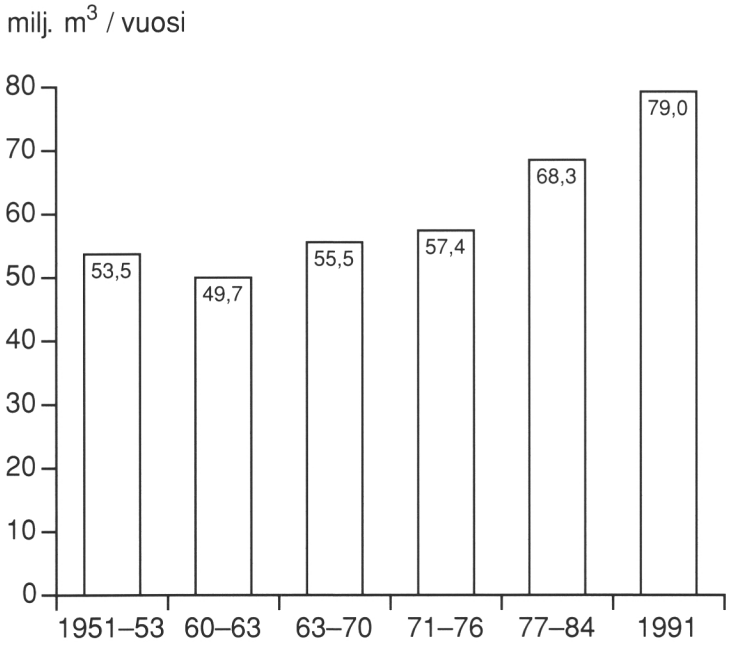
Metsien inventointitulokset osoittavat metsävarojen lisääntyneen voimakkaasti kahden viime vuosikymmenen aikana (kuva 14). Vaikka Suomen metsäpinta-ala pieneni 11 % sodan jälkeisten aluemenetysten takia, ensimmäisen (1922–24) ja toisen (1936–38) inventoinnin arviot puuston tilavuudesta olivat nykyistä pienempiä, noin 1600 miljoonaa kuutiometriä. Meneillään olevan kahdeksannen inventoinnin (VMI8) mukaan puuston tilavuus on edelleen noussut ja on nykyisin arviolta 1880 miljoonaa kuutiometriä. Vaikka puunkäyttö on lisääntynyt viime vuosikymmeninä, metsien kasvu on ollut hakkuumääriä ja luonnonpoistumaa suurempaa. Metsät ovat nykyisin runsaspuustoisempia kuin vuosisadan alkupuolella, ja soiden ojitus on korvannut aluemenetysten aiheuttaman metsämaan alan vähenemisen.

Kasvu oli 1960-luvun alun inventointitulosten mukaan vain 73 % vuonna 1984 päättyneen valtakunnan metsien 7. inventoinnin (VMI7) kasvuarviosta (kuva 15). Tulokset meneillään olevasta VMI8:sta kertovat Etelä-Suomen metsien kasvun olevan edelleen voimakkaassa noususuunnassa.

Myös metsien ikärakenne on muuttunut (kuva 16). Vanhoja, yli satavuotiaita metsiköitä on Etelä-Suomessa nykyisin enemmän kuin vuosisadan alkupuolella. Inventoin-

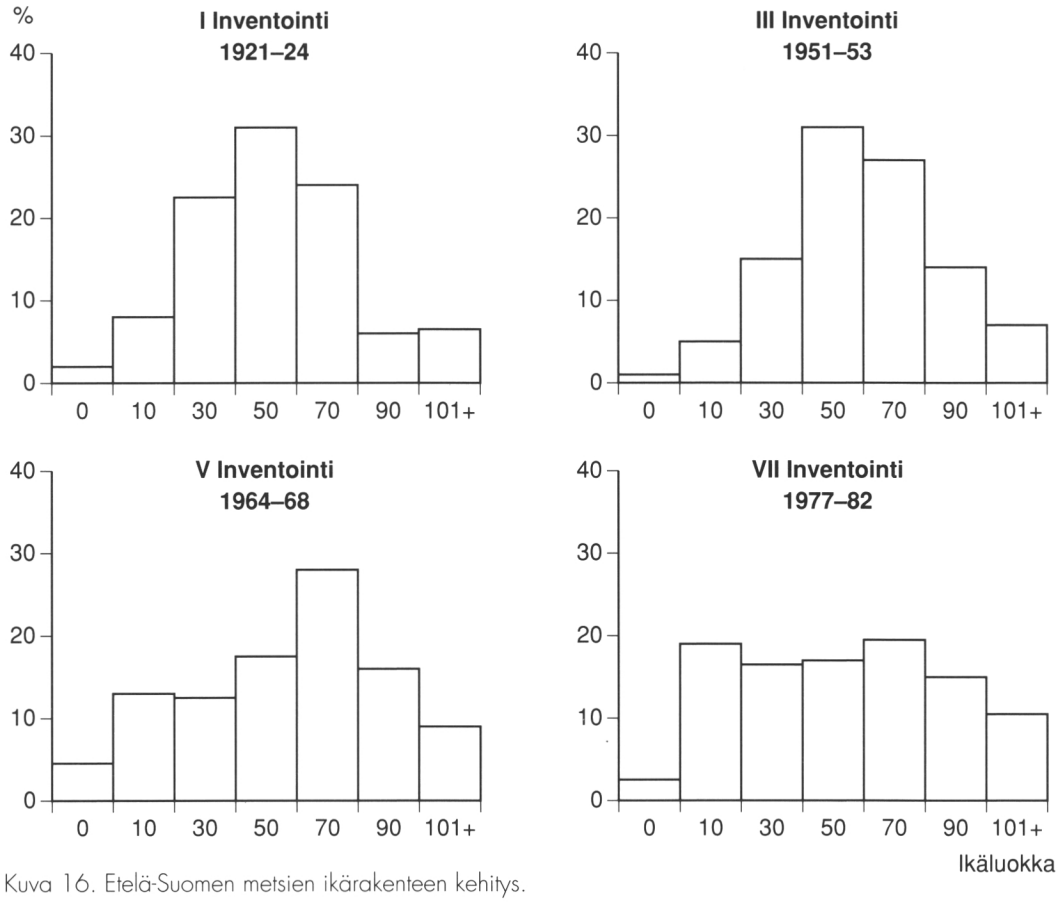


Kuva 14. Puuston runkotilavuuden kehitys Suomessa valtakunnan metsien inventointien mukaan. Vuoden 1991 arvio perustuu tietokonesimulointeihin.



Kuva 15. Puuston kasvu valtakunnan metsien inventointien mukaan. Vuoden 1991 arvio perustuu VMI:tä pienempään tutkimusaineistoon.

titulosten vertailu ei tosin tältä osin ole täysin ongelmatonta, sillä vuosisadan alkupuolella metsät olivat usein poimintahakkuiden seurauksena puustoltaan eri-ikäisiä. Keski-ikä kuvaa tällaisissa metsiköissä huonosti puuston ikärakennetta ja sen määrittäminen on myös vaikeaa. Yli-ikäisten, nopeimman kasvun vaiheen ohittaneiden metsien yleistyminen uhkaa heikentää merkittävästi Etelä-Suomen metsien kasvua.



Kuva 16. Etelä-Suomen metsien ikärakenteen kehitys.

Aiheesta enemmän

Aarne, M. (toim.). 1992. Metsätilastollinen vuosikirja 1990–1991. Folia Forestalia 790. 281 s.

Kuusela, K. & Salminen, S. 1991. Suomen metsävarat 1977–1984 ja niiden kehittyminen 1952–1980. Acta Forestalia Fennica 220. 84 s.

2.2 Puiden kasvu elinvoimaisuuden kuvaajana

Metsäpuiden elinvoimaisuus näkyy niiden kasvussa; vain elinvoimainen puu pystyy kasvamaan, tuottamaan lisää biomassaa. Puiden kasvu on monimutkainen prosessi, jota säätelevät mm. ilmaston vaihtelut, maaperä, puiden väliset vuorovaikutukset ja puun fysiologian lainalaisuudet sekä neulas- ja lehtituhot. Kasvun vaihtelun syiden erittäleminen samoin kuin tulevan kasvun ennustaminen onkin hyvin vaikeaa.

Ilmakehän muutokset ja metsien kasvu

Ilmakehän muutokset voivat vaikuttaa kasvuun monin eri tavoin. Muutokset ilmakehän koostumuksessa eivät yksinomaan heikennä puiden kasvua, sillä esimerkiksi hiilidioksidipitoisuuden nousun tiedetään kiihdyttävän kasvien yhteyttämistä. Typpilaskeuma puolestaan lannoittaa metsämaata.

Hapan laskeuma lisää maaperän ravinteiden liukoisuutta. Teorian mukaan tämä voi aluksi lisätä puiden käytettävissä olevia ravinteita ja siten kiihdyttää kasvua. Vähitellen metsämaan ravinnevarat voivat kuitenkin vähentyä, jolloin kasvu voi heikentyä. Myös mahdollisen maapallon keskilämpötilan nousun, ns. kasvihuoneilmiön voimistumisen, on arveltu lisäävän metsien tuotosta Suomea vastaavissa ilmasto-oloissa, joissa lämpötila on tärkeimpiä kasvua rajoittavia tekijöitä.

Useimmissa tutkimushypoteeseissa on kuitenkin korostettu ilman epäpuhtauksien metsien kasvua heikentäviä vaikutuksia. Kokeelliset tulokset ovat myös todistaneet monien kemiallisten yhdisteiden heikentävän puun kasvua. Eniten huomiota on kiinnitetty typpi- ja rikkiyhdisteiden, raskasmetallien ja otsonin vaikutuksiin. Esimerkiksi laajoilla alueilla Keski-Euroopassa esiintyvät rikkipitoisuudet ovat laboratorio-oloissa vähentäneet taimien kasvua. Kahden tai useamman aineen yhteisvaikutus on lisäksi osoittautunut erityisen haitalliseksi. Myös teollisuusympäristöjen metsissä tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet, että ilmansaasteet voivat merkittävästi alentaa metsien tuotosta.

Luonnonmetsistä tehtävillä mittauksilla voidaan saada yleiskuva puiden kasvun kehityksestä, ja yksittäisen puun kasvu voidaan helposti mitata vuosilustoista koko puun elinajalta. Lustosarjoista näkyvän kasvunvaihtelun syiden analysointi on sen sijaan ongelmallisempaa. Lukuisat puihin ja niiden kasvuympäristöön liittyvät tekijät aiheuttavat nimittäin puun kasvussa sekä lyhytaikaista vaihtelua (lämpötila, sademäärä) että trendinomaisia muutoksia (puun ikä). Talousmetsissä myös metsien käsittely aiheuttaa puiden kasvun vaikeasti analysoitavaa vaihtelua.

Miten erottaa kasvuvaihtelun syyt?

Kasvututkimuksen tehtävänä on erottaa ympäristömuutosten vaikutukset lukuisten muiden tekijöiden aiheuttamasta kasvun kokonaisvaihtelusta. Ongelmaa voidaan lähestyä useista lähtökohdista. Mikäli tutkimusaineiston perusteella tehtävät johtopäätökset halutaan yleistää kaikkiin Suomen metsiin, aineisto on valittava tilastollisella otannalla. Tällaista tutkimusaineistoa kerätään valtakunnan metsien inventoinneissa. Laajojen aineistojen keruu on kuitenkin työlästä ja kallista. Subjektiivisesti valittuja suppeampia aineistoja voidaan käyttää esitutkimuksessa,

esimerkiksi selvitettäessä kasvuvaihtelun aiheuttajien vaikutusmekanismeja. Tällöin on kuitenkin varottava yleistämästä tuloksia perusteettomasti.

Laajoja edustavia tutkimusaineistoja voidaan analysoida tilastotieteen sovellutusten avulla. Yleinen tapa selvittää kasvun vaihtelua on ns. kasvuindeksien määrittäminen. Kasvuindeksit kuvaavat puun vuotuisen kasvun suhteellista tasoa verrattuna pitkän ajan keskiarvoon. Indeksejä laadittaessa voidaan kasvuaineistosta poistaa häiritsevien tekijöiden aiheuttamaa vaihtelua.

Selvitettäessä ilmakehän muutosten vaikutuksia kasvuun esimerkiksi metsien tiheyden, ikärakenteen ja metsänhoitotöiden vaikutukset tulisi eliminoida aineistosta. Osittain tämä voidaan tehdä aineiston valinnalla jättämällä analyyseistä pois metsiköt, joissa esimerkiksi harvennus on vaikuttanut tarkasteltavan ajanjakson kasvuun. Tämän jälkeen voidaan tilastotieteen menetelmillä poistaa aineiston tarkastelun kannalta kiinnostamaton vaihtelu. Jäljelle jäävät ilmaston sekä tuntemattomien tekijöiden, esimerkiksi ilmansaasteiden vaikutukset kasvuun.

Kokeellinen tutkimus

Tietoa ympäristömuutosten vaikutuksista metsien kasvuun voidaan hankkia empiiristen aineistojen avulla. Kokeellinen tutkimus on selkein esimerkki tästä lähestymistavasta. Metsäpuiden taimien kasvua erilaisissa oloissa on tutkittu altistamalla niitä säädellyissä oloissa ilmansaasteille. Tällaiset kokeet tuottavat arvokasta perustietoa biologisista prosesseista. Kasvihuonetaimissa havaittujen kasvureaktioiden yleistäminen luonnonoloissa kasvaviin metsiin on kuitenkin kyseenalaista.

Suurikokoiset metsäpuut ja etenkin kokonaiset metsiköt ovat kuitenkin vaikeita kohteita tämäntapaiseen kokeelliseen tutkimukseen. Esimerkiksi Englannissa on viime vuosina kehitetty koejärjestelyjä, joissa altistetaan suurehkoja puuryhmiä eri saastepitoisuuksille. Tällöin tulokset kuvaavat paremmin metsikön reagointia ilmansaasteisiin.

Toinen kokeellisen työskentelyn perusongelma on tutkittavien prosessien hitaus. Kaasutuskokeissa on suhteellisen helppoa saada aikaan akuutteja, korkeiden epäpuhtauspitoisuuksien aiheuttamia vaurioita. Osa prosesseista, esimerkiksi happamoitumisen aiheuttamat maaperämuutokset, on kuitenkin luonteeltaan hyvin hitaita, ja muutosten vaikutuksia puiden kasvuun on vaikea tutkia kokeellisesti.

Kasvun ennustaminen on vaikeaa

Metsän kasvua voidaan ennustaa simuloimalla eli jäljittelemällä metsäekosysteemin toimintaa mallien avulla. Tämä lähestymistapa on yleistynyt viime vuosina eri puolilla

maailmaa. Suomessa on sovellettu systeemianalyysiin pohjautuvia menetelmiä ympäristömuutoksista johtuvien kasvumuutosten ennustamiseen. Vaikeutena on kuitenkin ennusteiden luotettavuus; puutteellisesti tunnetun ilmiön käyttäytymistä on vaikea kuvata malleilla niin hyvin, että ennusteet olisivat tarkkoja ja realistisia.

2.3 Kasvumuutosten syyt

Suomen metsien kasvun voimakkaan lisääntymisen taustalla on monia selkeitä syitä. Tällä vuosisadalla on ojitettu noin 5,8 miljoonaa hehtaaria turvemaita, minkä arvioidaan lisänneen metsien vuotuista kasvua noin 6–7 milj. m^3. Kasvuun on vaikuttanut myös lannoitus, sillä 1970-luvun alussa lannoitettiin vuosittain noin 1 % metsäalasta. Myös hakkuumenetelmät ovat kehittyneet. Nykyisissä harvennusohjeissa kiinnitetään erityistä huomiota kasvatettavaksi jätettävän puuston määrään ja laatuun, mikä on lisännyt metsien tuotosta.

Kasvun lisääntymiseen ovat metsänhoitomenetelmien kehittymisen lisäksi saattaneet vaikuttaa myös muut ympäristötekijät, kuten esimerkiksi ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden nousu ja typpilaskeuma. Näitä kasvun vaihtelun syitä on selvitetty pitkäaikaisten seuranta-aineistojen avulla.

Etelä-Suomen männiköiden kasvun muutoksia viimeisten kolmenkymmenen vuoden ajalta on selvitetty VMI:n aineistoista, joiden laajuus takaa tulosten yleistettävyyden. Tarkasteltaviksi valittiin VMI3:n (1951–53), VMI6:n (1971–76) ja VMI7:n (1977–84) aineistoihin kuuluvat puolukkatyypin männiköt, jotka täyttivät ikäluokkaan, metsänhoidolliseen tilaan ja yksijaksoisuuteen liittyvät ehdot. Näiden rajausten jälkeen eri inventointien aineistot osoittautuivat vertailukelpoisiksi — esimerkiksi ikäjakaumat olivat hyvin samantapaisia.

Jokaisen inventoinnin aineistoista laskettiin puuston keskimääräiset tilavuuskasvut viiden vuoden jaksolle (mittaushetkestä viisi edellistä vuotta). VMI3:n ja VMI6:n kasvutulokset olivat keskenään samaa tasoa (3,8–3,9 m^3/ha/vuosi), mutta VMI7:n mukainen keskikasvu oli selvästi korkeammalla tasolla (4,4 m^3/ha/vuosi). Koska eri inventointien aineistot todettiin vertailukelpoisiksi puuston iän ja tiheyden suhteen, kasvun lisäys johtunee osittain muista tekijöistä kuin metsien käsittelystä. Tätä tukivat myös tuloksen varmentamiseksi tehdyt tilastolliset lisätarkastelut.

Tehtyjen kasvuindeksitutkimusten perusteella seitsemännen inventoinnin kasvutulokset olivat ilmastollisesti hieman suotuisammalta jaksolta kuin kolmannen ja kuu-

dennen. Havaittu kasvuero inventointien välillä oli kuitenkin niin suuri, ettei sen katsottu kokonaisuudessaan selittyvän ilmastotekijöillä. Ilmeisesti jokin ilmastosta ja metsien käsittelystä riippumaton tekijä on lisännyt metsien tuotosta.

VMI-aineistosta lasketut kasvuindeksit

Valtakunnan metsien inventointien aineistojen perusteella on laadittu kasvun tasoa kuvaavia kasvuindeksejä. Lineaaristen mallien avulla aineistosta on poistettu mm. metsikön iän ja tiheyden sekä puun suhteellisen koon vaikutukset kasvuun. Jäljelle jäävä kasvun vaihtelu johtuu mm. ilmastosta ja muiden ympäristötekijöiden kuten ilmansaasteiden vaikutuksista.

Kuusen kasvun taso on noussut lievästi 1960-luvulta alkaen aina 1980-luvun puoliväliin saakka (kuva 17). Vuonna 1973 tosin oli tilapäinen voimakas taantuma, joka johtui osin runsaasta käpy- ja siemensadosta, osin kasvukauden kuivuudesta. Tilastollisissa analyyseissä sademäärän muutokset riittivät kuitenkin selittämään kasvun lisäykset. Myös vuoden 1989 kesä oli erittäin kuiva, mikä näkyy kuusen kasvussa (ks. myös *Havupuiden käpysato 1987–89,* s. 116).

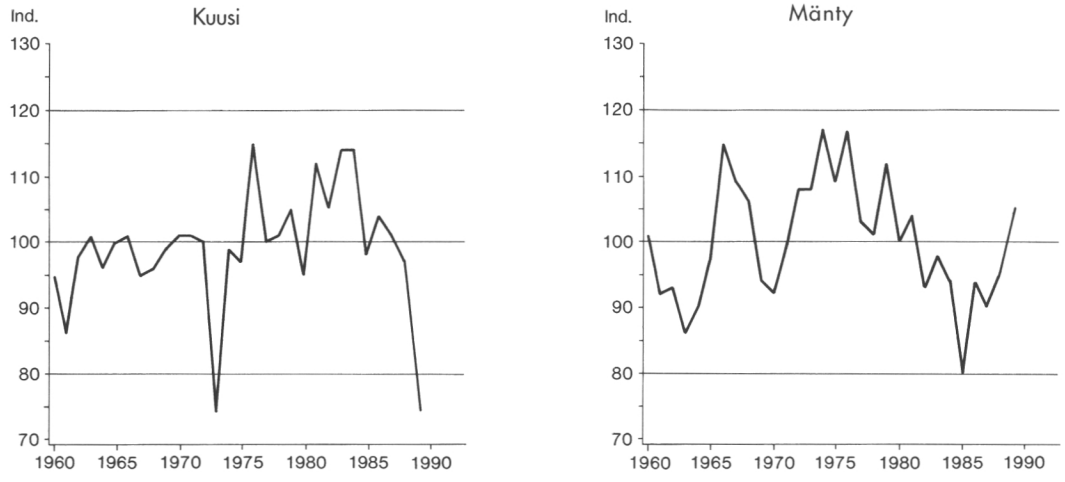
Männyn kasvuindeksit ovat myös nousevia 1960-luvun alusta 1970-luvun puoliväliin saakka. Sen jälkeen männyn kasvu on kuitenkin kehittynyt täysin eri tavoin kuin kuusella. Sen indeksisarjat laskevat 1980-luvulla keskimääräisen tason alapuolelle. Kuitenkin vuosikymmenen loppupuoli oli jälleen suotuisaa männyn kasvulle.

Männyn ja kuusen kehityksen poikkeaminen selkeästi toisistaan viimeisen puolentoista vuosikymmenen aikana ei ole epätavallista. Biologisesti erilaisina puulajeina ne reagoivat eri tavoin kasvuolosuhteiden muutoksiin. Tämän voi helposti havaita myös tarkastelemalla vanhempia kasvuindeksitutkimuksia.

Yksi syy männyn kasvun taantumaan on 1980-luvulla nopeasti yleistynyt männynversosurma. Viimeisten inventointitietojen mukaan se on vahingoittanut noin kymmenesosaa Etelä-Suomen männiköistä. Taudin vaikutuksia puun kasvuun ei ole kuitenkaan tutkittu riittävästi. On tosin ilmeistä, että neulasmassaa voimakkaasti vähentävänä se aiheuttaa huomattavia kasvutappioita pahasti vaurioituneissa metsiköissä. Kuitenkin on vaikea arvioida, kuinka paljon kasvun taantumasta selittyy yksinomaan versosurman vaikutuksella (ks. *Harsuuntuminen ja puun kasvu*, s. 88).

Tarvitaan pidempiä tarkastelujaksoja

Vajaan kolmenkymmenen vuoden tarkastelujakso on riittämätön, jotta voitaisiin luotettavasti päätellä, onko esimerkiksi havaittu männyn kasvun taantuma tilapäinen



Kuva 17. Kuusen ja männyn kasvuindeksin kehitys 1960-luvulta lähtien.

ilmiö vai osa trendinomaista muutosta. Männyn hyvä kasvu viime vuosina viittaa kuitenkin siihen, että kyse olisi ollut vain tilapäisestä taantumasta.

Hieman samantapainen aikasarja-analyysin ongelma on runsaasti keskustelua herättänyt kysymys maapallon keskilämpötilan mahdollisesta noususta. Säännöllisiä lämpötilamittauksia on olemassa useiden vuosisatojen ajalta eri puolilta maailmaa, mutta siitä huolimatta aikasarjoista on voitu tehdä vain alustavia, epävarmoja johtopäätöksiä.

Valitettavasti vuosisadan alkupuolella kerättyjä ensimmäisten valtakunnan metsien inventointien aineistoja on lähes mahdoton hyödyntää tämäntyyppisiin tarkasteluihin, sillä vanhojen kasvuaineistojen mittausmenetelmät ja valmiudet aineistojen taltiointiin olivat puutteellisia.

Kasvun lisäykseen ovat vaikuttaneet myös muut tekijät kuin metsien hoito

Muutamat pienempiin aineistoihin perustuvat tutkimukset ovat niin ikään antaneet viitteitä siitä, että metsien kasvunlisäys saattaa selittyä osittain jollain metsien hoidosta riippumattomalla tekijällä. Tällaiseen johtopäätökseen on tultu mm. tutkimalla Etelä-Suomen luonnonsuojelualueiden ja Lapin vanhojen, hakkaamattomien alueiden puustoja. Myös näiden metsien kasvun on havaittu selittämättömällä tavalla kiihtyneen viimeisten vuosikymmenien aikana. Tätä ei analyysitulosten mukaan pysty selittämään pelkästään ilmaston vaihtelulla, vaan nämä tutkimukset antavat tukea teorialle ilmakehän koostumuksen muutosten aiheuttamasta metsien kasvun lisäyksestä.

Suomen metsät ovat viime vuosikymmeninä tuottaneet enemmän puuta kuin todennäköisesti koskaan aikaisemmin. Olisi kuitenkin hyvin kyseenalaista päätellä korkean kasvun tason osoittavan, etteivät ilman epäpuhtaudet tulevaisuudessakaan voisi merkittävästi heikentää metsien tuotosta. On mahdollista, että vaikutukset puuston kasvuun tulevat näkyviin tietyllä viiveellä. Nykykäsityksen mukaan esimerkiksi maaperän ravinteisuuden muutokset ovat hyvin hitaita; niiden vaikutukset saattavat tulla näkyviin kasvussa vasta vuosikymmeniä muutosprosessin alkamisen jälkeen.

Tähänastiset tutkimustulokset viittaavat kuitenkin selkeästi siihen, että ilmakehän koostumuksen muutokset ovat saattaneet kiihdyttää metsänkasvua Suomessa.

Kasvututkimukset ulkomailla

Suomalaisille kasvututkimuksille on varsin niukalti vertailukohtia muista maista. Esimerkiksi Keski-Euroopan vakavimmilla metsävaurioalueilla metsien kasvukehitystä on analysoitu yllättävän vähän. Tämä johtuu osittain metsätalouden suhteellisen pienestä kansantaloudellisesta merkityksestä useimmissa maissa. Myös hakkuumäärät ovat niissä yleensä selvästi vuotuista kasvua pienempiä.

Vain muutamissa Keski-Euroopan maissa hankitaan tietoa metsävarojen määrästä ja puuston kasvusta valtakunnallisten inventointien avulla. Ennakkotiedot Saksan uusimmasta valtakunnallisesta metsien inventoinnista kertovat erittäin suuresta kokonaiskasvun lisäyksestä. Itävallassa on seurattu 25 vuoden ajan puuston määrää ja kasvua; kumpikin on lisääntynyt koko tarkastelujakson ajan.

Suppeammatkaan kasvututkimukset eivät ole tyhjentävästi dokumentoineet Keski-Euroopan metsien kasvunvaihtelua viime vuosikymmenten aikana. Muutamissa yksittäisissä tutkimuksissa on kuitenkin tehty samansuuntaisia havaintoja kuin suomalaisissa tutkimuksissa. Saksanpihdan kasvutrendejä Ranskan koillisosan vuoristoalueilla selvitellyt tutkimus osoitti kasvun lisääntyneen hyvin selkeästi vuosisadan alkupuolella. Länsi-Saksan lounaisosissa, Baden-Württembergin osavaltiossa, on seurattu kuusen kasvua pysyvillä koealoilla yli sadan vuoden ajan. Nykyiset puusukupolvet kasvavat selvästi edeltäjiään nopeammin, vaikka metsänhoidolliset toimenpiteet on pyritty pitämään mahdollisimman samanlaisina koko seurantajakson ajan. Ilmansaastelaskeumat eivät kummallakaan näistä alueista ole läheskään niin suuria kuin Keski-Euroopan pahiten vaurioituneilla metsäalueilla. Pahoilla metsävaurioalueilla esimerkiksi Tsekkoslovakian luoteisosien vuoristoissa on todettu huomattavia kasvumenetyksiä.

Tällä hetkellä ilman epäpuhtauksien Keski-Euroopassa aiheuttamista kasvumuutoksista on vaikea saada selkeää kokonaiskuvaa. Kasvututkimukset ovat lähivuosina tulos-

sa osaksi yleiseurooppaista metsävaurioiden seurantajärjestelmää. Tämä antanee tulevaisuudessa paremmat mahdollisuudet kasvumuutosten seurantaan ja analysointiin.

Aiheesta enemmän

Henttonen, H. 1990. Kuusen rinnankorkeusläpimitan kasvun vaihtelu Etelä-Suomessa. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitoksen tiedonantoja 25: 1–88.

Jukola-Sulonen, E-L., Korhonen, M., Nöjd, P. ja Raitio, H. 1989. Inkoon voimalaitoksen ympäristön metsien seurantatutkimus vuosina 1988–1989. Imatran Voima Oy, tutkimusraportteja IVO-A-11/89.

Nöjd, P. 1990. Detecting forest growth responses to environmental changes — a review of Finnish studies. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. ja Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 507–522.

3. Metsämaan happamoituminen

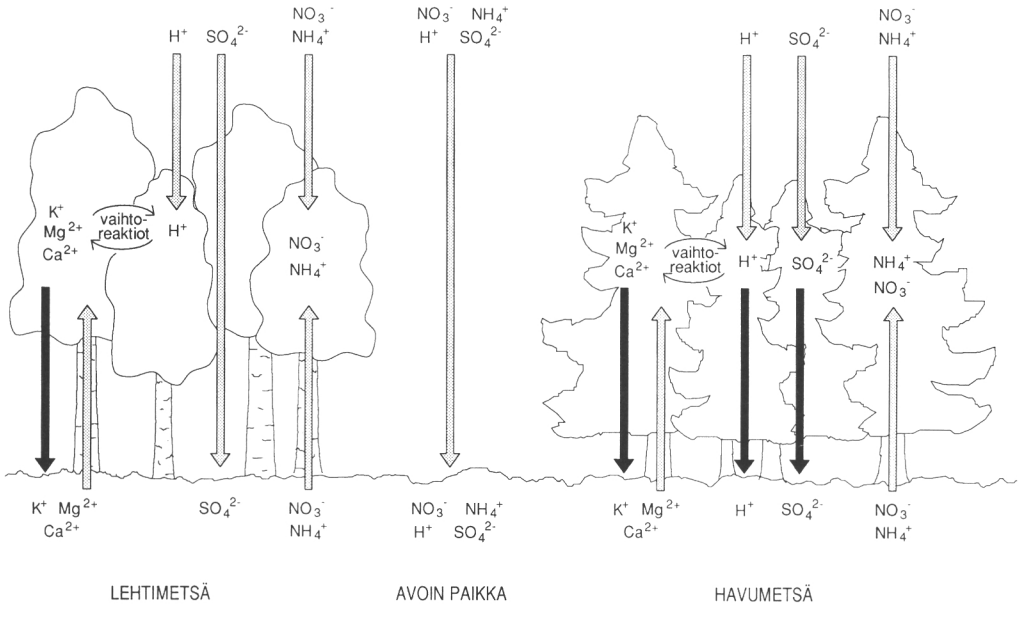
3.1 Hapan laskeuma ja metsikön ravinnekierto

Laskeuma metsiköissä

Sadeveden happamuuteen eniten vaikuttavat ionit ovat vety (H^+), sulfaatti (SO_4^{2-}), nitraatti (NO_3^-), kalsium (Ca^{2+}), kalium (K^+) ja ammonium (NH_4^+). Metsämaahan tuleva sadevesi poikkeaa sekä koostumukseltaan että määrältään huomattavasti aukealle paikalle tulevasta ns. vapaasta sadannasta. Metsikössä sateen laatuun ja määrään vaikuttavat laskeuma- ja sääolojen lisäksi mm. puulaji, puuston määrä sekä puiden kunto ja ikä. Osa sateesta pidättyy lehvästöön tai haihtuu siitä ilmaan, osa tulee metsämaahan suoraan latvusaukoista ja latvuston läpi (metsikkösadanta) ja pieni osa runkoa pitkin valuen (runkovalunta). Puustoon pidättyy sen ominaisuuksista riippuen 15–30 % kokonaissadannasta. Havupuiden latvukset pidättävät yleensä enemmän sadetta kuin lehtipuiden latvukset.

Metsämaahan tulevassa sadevedessä on ilmasta liuenneita aineita, vaikeasti määritettävä osuus latvustoon kertynyttä ja sadeveteen sekoittunutta kuivalaskeumaa sekä puun omia aineenvaihduntatuotteita. Lehtipuiden lehtien pinnoilla sadevedessä tapahtuu kemiallisia reaktioita, jotka vähentävät sadeveden happamuutta. Havupuiden neulasten pinnalla tapahtuvat reaktiot puolestaan usein lisäävät sateen happamuutta (kuva 18).

Puut ottavat maasta mm. emäksisiä ravinneioneja (K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+} jne.), joita kulkeutuu aineenvaihdunnassa (ks. *Metsikön ja puun ravinnekierto,* s. 44) aina lehtien ja neu-



Kuva 18. Yksinkertaistettu kaavio lehti- ja havupuuston latvustojen vaikutuksesta sadeveden kemiallisiin ominaisuuksiin. Kasviin siirtyy typpiyhdisteitä juurten ravinnonoton kautta, imeytymällä suoraan ilmasta neulasiin ja lehtiin sekä sadeveden välityksellä.

lasten pinnoille asti. Sadeveden mukana ravinteita huuhtoutuu takaisin maahan, jolloin ne samalla neutraloivat sadeveden happamuutta.

Latvusto vaikuttaa metsämaahan tulevaan laskeumaan

Latvuston vaikutusta laskeumaan ja sadeveden happamuuteen eri puulajien metsiköissä tutkittiin kuudessa metsikössä Etelä-Suomessa (kuva 19 ja taulukko 1). Sadevesinäytteet kerättiin viikoittain, ja lisäksi kevättalvella otettiin hangesta luminäytteet. Näytteistä mitattiin mm. happamuus, rikki- ja typpiyhdisteet ja emäskationit (Ca^{2+}, K^{+}, Mg^{2+}).

Aukealla paikalla rikki- ja typpikuormitus (kg/ha/vuosi) oli suurin Tuusulan Ruotsinkylässä ja pienin Punkaharjulla (taulukko 1). Kuusikoissa maahan tuli suurempi rikkikuormitus kuin männikössä tai koivikoissa.

Metsikkösadannan yleisimpiä ioneja olivat sulfaatti, kalsium, kalium, magnesium ja vety (kuva 20). Sulfaattilaskeuma oli kuusikoissa noin kaksinkertainen aukeaan verrattuna. Maahan tuleva vetyionilaskeuma oli koivikoissa ja männiköissä 26–31 % pienempi, kuusikoissa 41 % suurempi kuin aukealla.

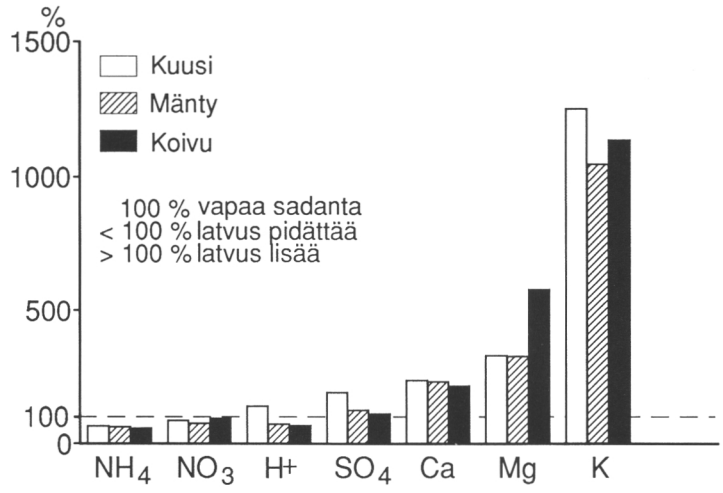
Kun käyttökelpoista typpeä on metsämaissa niukasti, puut ottavat typpeä maaperän lisäksi myös sadevedestä. Vapaan sadannan ammoniumista pidättyi puustoon keskimäärin 40 % ja nitraatista yleensä alle 20 %. Useimpien muiden ravinteiden määrät sen sijaan yleensä lisääntyvät sateen kulkiessa latvuskerroksen läpi.



Kuva 19. Metsikkösadannan mittauskohde. Valokuva: Arja Hyvärinen.

Taulukko 1. Typpi- ja rikkikuormitus aukeilla paikoilla ja metsiköissä vuonna 1986.

Koealan sijainti	Puulaji	Typpi		Rikki	
		Aukea	Metsä	Aukea	Metsä
		(kg/ha/v)			
Jokioinen	Kuusi	4,7	3,0	5,1	8,6
Virolahti	Kuusi	6,2	3,9	7,7	12,1
Ruotsinkylä	Kuusi	7,0	6,6	8,4	15,0
Punkaharju	Mänty	3,7	2,6	4,6	5,7
Ruotsinkylä	Koivu	7,0	5,5	8,4	7,8
Jokioinen	Koivu	5,1	4,3	5,4	5,5



Kuva 20. Latvuston vaikutus metsikköön tulevaan laskeumaan. Vastaavaa aukean alan (vapaa sadanta) laskeumaa on kuvattu suhdeluvulla 100 %.

Lehtimetsän latvusto lisää emäskationien määriä sadevedessä, mutta se ei sanottavasti vaikuta sulfaatin määrään. Sen sijaan lehtimetsän latvusto neutraloi sadevettä vähentämällä/sitomalla happamuutta aiheuttavia vetyioneja.

Havumetsän latvusto lisää useiden ionien, ennen kaikkea emäskationien, määrää metsämaahan tulevassa sadevedessä. Myös sulfaatti- ja vetyionit lisääntyvät sateen kulkiessa latvuston läpi. Havupuiden sadevettä happamoittava vaikutus johtuu lähinnä kuivalaskeumana latvustoon sateettomina aikoina ja talvella kertyneistä sulfaatti- ja vetyioneista, jotka huuhtoutuvat sateen mukana maahan.

Sateen happamuus riippuu veteen liuenneiden emästen ja happojen määrien suhteista. Vuosina 1985–86 aukeilla paikoilla sijainneilla ILME-projektin koealoilla sadeveden keskimääräinen happamuus vaihteli pH 4,1–4,9. Sadevesi oli vähiten hapanta, eli pH-luku oli korkein, Kaakkois-Suomessa, jonne kantautuu Venäjän energiatuotannosta peräisin olevaa emäspitoista laskeumaa.

Aiheesta enemmän

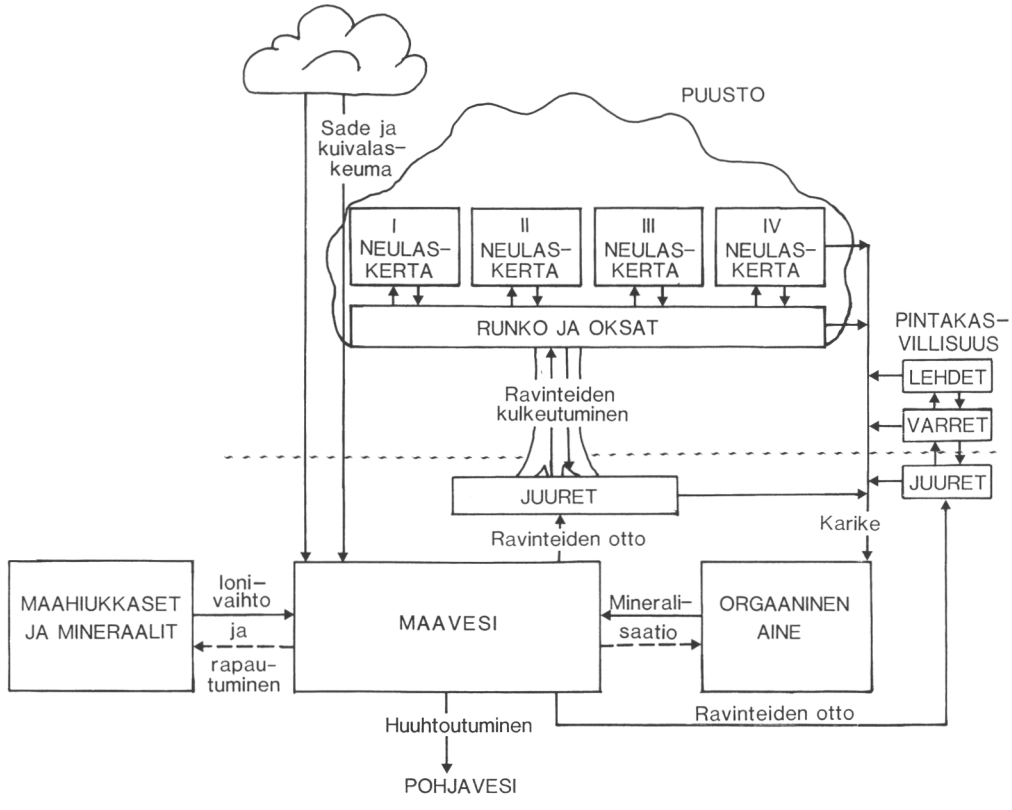
Happamoituminen Suomessa. HAPROn loppuraportti. 1990. Kauppi, P., Anttila, P., Karjalainen-Balk, L., Kenttämies, K., Kämäri, J. & Savolainen, I. (toim.). YM:n Sarja A/1990. Ympäristöministeriö, ympäristönsuojeluosasto.

Hyvärinen, A. 1990. Deposition on forest soils — effect of tree canopy on throughfall. Teoksessa: Kauppi, P., Kenttämies, K. & Anttila, P. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag, s. 199–213.

Metsikön ja puun ravinnekierto

Ravinteiden ja perustuotannon (biomassan tuotannon) vuorovaikutuksen ymmärtäminen edellyttää metsikön ravinnekierron tuntemista (kuva 21). Kasvupaikan ravinteisuus vaikuttaa keskeisesti puuston kasvuun. Metsämaan ravinteisuuteen puolestaan vaikuttavat mineraalien rapautuminen ja ravinteiden kierto metsäekosysteemissä.

Pitkällä aikavälillä metsikön ravinnetase, eli siihen tulevien ja siitä poistuvien ravinteiden väliset suhteet, muodostuu sadannan mukana tulevien ja huuhtoutuvan veden poiskuljettamien ravinnemäärien erotuksena. Ravinne-



Kuva 21. Metsikön ravinnekierto. Suurin osa metsikön ravinteista on sitoutuneena puustossa, pintakasvillisuudessa ja maassa. Pieni osa ravinteista on ravinnevirroissa, jotka kuljettavat ravinteita ekosysteemin eri osien välillä. Metsikön ravinnevirrat voidaan jakaa kolmeen osaan:
1) Ravinteita tulee metsikköön kasvillisuuden saataville sateen ja kuivalaskeuman mukana, biologisessa typensidonnassa, rapautumalla mineraaleista sekä lannoitettaessa.
2) Ravinteita poistuu metsiköstä pääosin huuhtoutumalla sekä puunkorjuun ja keräilytuotteiden mukana.
3) Ravinteet ovat metsikössä ns. biologisessa kierrossa. Puiden maavedestä ottamat ravinteet kulkeutuvat solukoihin, joissa ne joko varastoidaan tai käytetään yhteyttämiseen, hengitykseen tai kasvuun. Ravinteita vapautuu kasvinosien kuollessa ja kulkeutuu puun sisäisessä ravinnekierrossa takaisin eläviin solukoihin. Osa ravinteista poistuu puusta karikkeen mukana. Maahan palautuneet ravinteet vapautuvat vähitellen uudelleen kasvien käyttöön mineralisaatiossa eli orgaanisen aineen hajotustoiminnan tuloksena.

taseen avulla pyritään arvioimaan metsikön ravinnetilaa ja sen kehitystä. Metsikön ravinnetaseen avulla voidaan myös päätellä, kasautuuko ekosysteemiin ravinteita vai poistuuko niitä. Esimerkiksi ilmansaasteet voivat muuttaa metsikön ravinnetasetta. Seuraavassa tarkasteltavat tulokset ovat Ilomantsin Mekrijärveltä, jossa tutkimuskohteina oli kolme eri kehitysvaiheessa olevaa männikköä.

Hapan sadevesi huuhtoo ravinteita latvustosta

Sadeveden mukana ilmakehästä ja kasvillisuudesta maahan kulkeutuvat ravinteet ovat tärkeä osa metsikön ravinnekierrossa. Metsämaahan tulevan metsikkösadannan määrä ja laatu — erityisesti happamuus — vaikuttavat puolestaan maan pintakerroksen ominaisuuksiin ja ravinteiden saatavuuteen maasta.

Vuosina 1983–86 vapaan sadannan happamuus oli pH 4,0–5,2 Ilomantsin Mekrijärvellä. Sateen mukana maahan tuli eniten rikkiä ja typpeä, muita ravinteita sadevedessä oli vain vähän. Latvustosta huuhtoutuneet ravinteet ovat peräisin sekä lehtisolukoista että lehtien pinnalle laskeutuneista ilman aerosoleista ja pölystä eli kuivalaskeumasta.

Latvustosta huuhtoutui eniten kaliumia, koska se on helppoliukoisina yhdisteinä ja sitä on myös runsaasti lehden pinnan lähellä olevissa soluissa. Kalium on ainoa ravinne, jota palautuu maahan latvustosta huuhtoutumalla enemmän kuin karikkeen mukana. Typpeä huuhtoutui latvustosta silloin, kun solukoissa oli runsaasti liukoisia aminohappoja kasvun alkaessa ja karikesadon aikana. Muulloin kasvukauden aikana typpeä pidättyi latvustoon. Kationeja huuhtoutui latvustosta eniten vanhimmassa tutkitussa metsikössä.

Metsikön ravinnetase voi häiriintyä

Häiriintymätön metsäekosysteemi menettää maaperästä huuhtoutumalla tavallisesti vain vähän ravinteita. Huuhtoutumista saattaa kuitenkin esiintyä esimerkiksi keväällä lumen sulaessa, jolloin kasvit ottavat vähän ravinteita ja valunta on runsasta. Myös ilmansaasteet voivat muuttaa metsikön ravinnetasetta siten, että aineita kasautuu metsikköön tai niitä poistuu huuhtoutumalla.

Magnesium ja kalium ovat helpoimmin huuhtoutuvia kationeja, ja niistä voi tulla aikaa myöten puutetta (kuva 22). Typen määrä lisääntyy metsikössä, koska sitä tulee maahan sateen mukana huomattavasti enemmän kuin maasta huuhtoutuu pois. Kasvukauden aikana juuristo ja mikrobit käyttävät lähes kaiken maassa olevan typen. Syksyn ja talven aikana orgaanisista yhdisteistä vapautunutta typpeä huuhtoutuu maasta kuitenkin jonkin verran lumen sulaessa.

Karike hajoaa hitaasti

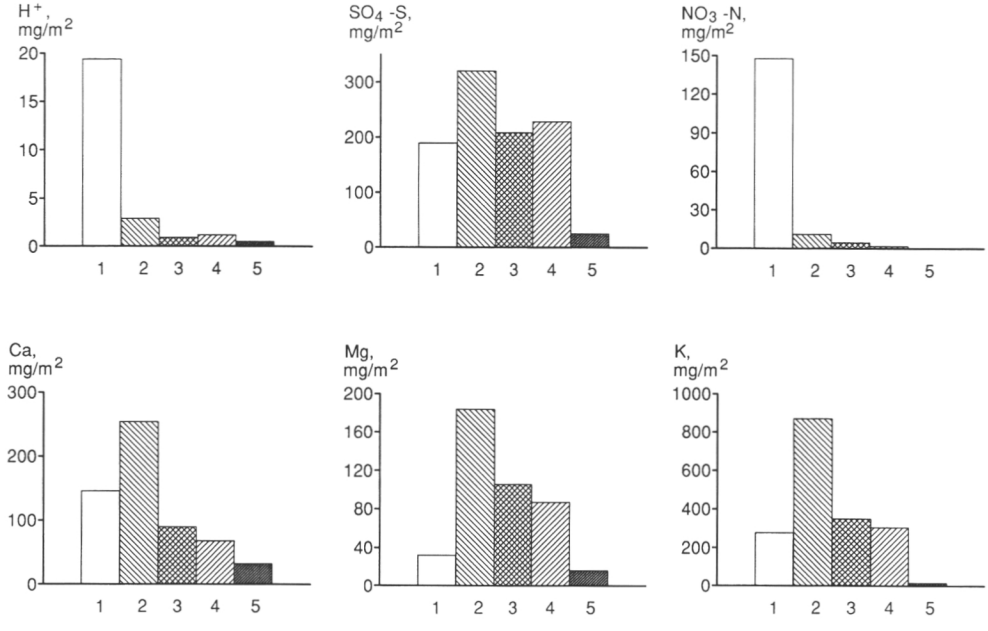
Metsikön kehityksen alkuvaiheessa puuston vuotuinen karikesato kasvaa latvuston sulkeutumiseen asti. Tutkimusalueella vuotuinen karikesato oli 450 kg/ha taimikossa, 1590 kg/ha kasvatusmetsikössä ja 2190 kg/ha uudistuskypsässä männikössä. Valtaosa havupuiden karikkeesta on neulasia. Metsikön vanhetessa neulasten osuus karikkeessa pienenee ja oksien, käpyjen ja kuoren osuudet kasvavat.

Juurikarikkeen määrää on vaikea mitata, mutta eräiden arvioiden mukaan se saattaa olla jopa suurempi kuin puuston maanpäällisen osan karikesato. Arvio perustuu tuloksiin, joiden mukaan puun vuotuisesta nettotuotoksesta kuluu 30–70 % hienojuurten uusiutumiseen. Mykorritsojen eli sienijuurten ja juurten tuotokseen saattaa kulua jopa 70–88 % puiden ottamista ravinteista.

Vain pieni osa humuksen orgaanisesta typestä voi mineralisoitua kasveille käyttökelpoisiksi epäorgaanisiksi ioneiksi yhden kasvukauden aikana. Metsämaan juuristokerroksen typpivaroista vain noin 1 % on yleensä mineralisoitunutta ja siten kasveille käyttökelpoista. Rikin ja fosforin mineralisaatio muistuttaa paljolti typen mineralisaatiota.

Puun sisäinen ravinnekierto säästää ravinteita

Ravinteet kiertävät myös puun sisällä. Niitä kulkeutuu puussa vanhenevista tai kuolevista kasvinosista nuorempiin osiin joko kasvussa käytettäväksi tai varastoitavaksi.



Kuva 22. Vapaan sadannan, metsikkösadannan ja vajoveden vetyioni- ja ravinnesisältö vuotuisen mittausjakson aikana keski-ikäisessä männikössä Ilomantsin Mekrijärvellä. Mittaustasot: 1 metsikkösadanta, 2 humuskerros, 3 humuskerros +5 cm, 4 humuskerros +13 cm ja 5 humuskerros +21 cm kivennäismaata.

Puun sisäiseen ravinnekiertoon voivat osallistua vain ne ravinteet, jotka pystyvät liikkumaan kasvin nilassa. Helposti liikkuvia ravinteita ovat typpi, fosfori ja kalium. Keskinkertaisesti liikkuvia ovat magnesium, sinkki, kupari, rauta, boori ja molybdeeni. Sen sijaan kalsium ja mangaani liikkuvat heikosti.

Liikkuvien ravinteiden määrä neulasissa vaihtelee ravinteiden saatavuuden ja sisäisen ravinnekierron mukaan. Syksyllä neulasten kellastuessa liikkuvien ravinteiden pitoisuudet kasvavat vihreissä neulasissa, joihin suuri osa kellastuvien ja pian putoavien neulasten sisältämistä ravinteista siirtyy (taulukko 2). Alkukesällä liikkuvat ravinteet vähenevät kiihkeimmän kasvun aikana vanhimmissa neulasissa, joista liikkuvia ravinteita kulkeutuu tarvittaessa kasvaviin osiin. Heikosti liikkuvia ravinteita keräytyy neulasiin niiden vanhetessa.

Sisäinen ravinnekierto vähentää maahan karikkeen mukana palautuvien ravinteiden määriä (taulukko 2). Sisäinen ravinnekierto helpottaa siten ravinteiden riittävyyttä silloin, kun ravinteiden saatavuus ja tarve ovat epätasapainossa. Se mahdollistaa ravinteiden säästön ja ravinteiden kulkeutumisen puun kasvaviin osiin keväällä, jolloin ravinteiden saatavuus maasta on huono.

Kasvun kannalta sisäinen ravinnekierto on hyvin tärkeä lyhyellä aikavälillä, esimerkiksi vuoden aikana. Pitkällä aikavälillä, kymmenien vuosien kuluessa, karikkeen sisältämien ravinteiden vapautuminen hajotustoiminnan kautta vaikuttaa merkittävästi ravinteiden saatavuuteen.

Sisäisen ravinnekierron on usein esitetty olevan tehokkainta vähäravinteisilla kasvupaikoilla. Monien viimeaikaisten tutkimusten mukaan parantunut ravinteiden saatavuus kuitenkin lisää neulasbiomassaa ja myös siihen sitoutuneiden ravinteiden määrää, jolloin enemmän ravinteita osallistuu sisäiseen ravinnekiertoon.

Havu- ja lehtipuiden sisäisen ravinnekierron tehokkuuden eroista on ristiriitaisia tietoja. Aiemmin lehtipuiden sisäistä ravinnekiertoa pidettiin huomattavasti tehokkaampana kuin havupuiden. Uusimmat tutkimukset osoittavat kuitenkin, että sisäinen ravinnekierto on lähes yhtä tehokas havu- ja lehtipuilla.

Taulukko 2. Männyn karikeneulasten sisältämää typpeä, fosforia ja kaliumia palautui Ilomantsissa takaisin puuhun ennen neulasten putoamista seuraavasti.

	N	P	K
		%	
Taimikko	61–76	73–86	80–90
Kasvatusmetsikkö	74–88	80–91	81–91
Uudistuskypsä metsikkö	67–76	78–87	75–85

Aiheesta enemmän

Helmisaari, H-S. 1990. Ravinnekierto metsäekosysteemissä. Teoksessa: Kangasmaiden ominaisuudet ja hoito. Maantutkimuspäivä Kouvolassa 1990. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 370: 18–36.

— & Mälkönen, E. 1989. Acidity and nutrient content of throughfall and soil leachate in three Pinus sylvestris stands. Scandinavian Journal of Forest Research 4: 13–28.

3.2 Metsämaan happamoituminen ja humuksen mikrobiologia

Humuksen muodostuminen

Metsäekosysteemissä mikrobisto ja maaperäeläimet hajottavat maassa olevaa orgaanista ainetta, joka koostuu pääasiassa karikkeesta eli kuolleista juurista, varsista, oksista, lehdistä ja neulasista sekä kuolleesta eliöstöstä. Kun orgaaninen aine hajoaa, siihen sitoutuneita ravinteita vapautuu eli mineralisoituu kasvillisuudelle ja aktiiviselle mikrobistolle uudelleen käyttökelpoiseen muotoon. Hajotettavasta orgaanisesta aineesta muodostuu aikaa myöten metsämaalle ominainen humus, joka koostuu monimutkaisista orgaanisista yhdisteistä.

Humuksen muodostumisnopeus, määrä ja laatu riippuvat mm. metsikön puulajisuhteista ja puuston tiheydestä, maan kemiallisista ja fysikaalisista ominaisuuksista sekä mikrobiston koostumuksesta ja aktiivisuudesta. Suomen oloissa metsämaan pinnalla on yleensä kangashumus- tai turvekerros, vain harvoin mullas- tai multakerros. Humus on yleensä sitä happamampaa mitä karummalla kasvupaikalla se syntyy.

Metsämaassa voi olla hajottajamikrobeja jopa metrin syvyydessä. Niitä on kuitenkin runsaimmin humuskerroksessa ja ylimmässä kivennäismaakerroksessa, joissa ne ovat aktiivisimpia ja joissa kasvien juuriakin on eniten.

Bakteerit ja sienet vastaavat pääosin orgaanisen aineen hajotuksesta joskin hajotuksen alkuvaiheessa orgaanisen aineen mekaanisessa hienontamisessa ovat tärkeitä myös maaperäeläimet, jotka ovat osoittautuneet herkiksi maan happamoitumiselle. Sienet pystyvät yleisesti hajottamaan selluloosaa, ja siihen pystyvät myös useat sädesienet, joilla on sekä sienten että bakteerien ominaisuuksia. Sen sijaan vain harvat bakteerilajit pystyvät tuottamaan hajotukseen tarvittavia sellulaasi-entsyymejä. Lisäksi orgaanisen kerroksen happamuus rajoittaa bakteerien aktiivisuutta metsämaassa.

Happaman laskeuman vaikutus metsäekosysteemissä kohdistuu yleensä maan pintakerrokseen, johon vuosittain tulee lisää kariketta. Elollisessa luonnossa ei muodostu sellaisia yhdisteitä, joita jokin mikrobi ei pystyisi hajottamaan. Epäsuotuisten hajotusolojen vuoksi metsämaahan kasaantuu kuitenkin paljon orgaanista ainetta.

Toistaiseksi tiedetään varsin vähän siitä, mitä metsämaan happamoituminen merkitsee orgaanisen aineen hajotuksen ja metsäekosysteemin ravinnekierron kannalta. Tiedot perustuvat pääasiassa kontrolloiduissa oloissa hapanta laskeumaa jäljittelevillä laboratorio- tai kenttäkokeilla saatuihin tuloksiin. Kokeissa on tutkittu esimerkiksi karikkeen hajoamista, maan hengitystä, entsyymiaktiivisuutta, bakteerien ja sienten määrää ja biomassaa sekä typen kiertoa.

Lyhytaikaisilla ja varsin voimakkailla happokäsittelyillä saadut koetulokset ovat usein olleet ristiriitaisia, eivätkä ne ole suoraan verrannollisia pitkän ajan kuluessa luonnonoloissa tapahtuviin muutoksiin. Ne osoittavat kuitenkin, että maan happamoituminen vaikuttaa selvästi mikrobiston lajikoostumukseen ja aktiivisuuteen.

Yleiskuva biologisesta aktiivisuudesta saadaan tarkastelemalla karikkeen hajoamista. Erittäin happamalle (pH 2–3) keinotekoiselle sateelle altistettaessa neulas- ja lehtikarikkeen massan väheneminen on yleensä hidastunut, mutta joissakin tapauksissa käsittely on jopa nopeuttanut hajoamista. Juurikarikkeen hajoaminen on selvästi hidastunut. Hapon laatu, voimakkuus ja käsittelyn kesto selittävät ainakin osan näistä ristiriitaisista tuloksista. Biologinen kokonaisaktiivisuus määritettynä hengityksenä tai hapen kulutuksena on useimpien tutkimusten mukaan selvästi heikompi hapolla käsitellyssä humuksessa kuin käsittelemättömässä.

Mikrobilajien herkkyys vaihtelee

Orgaanisen typen mineralisoituminen ammoniumiksi eli ammonifikaatio ei näytä riippuvan maan happamuudesta. Ammonifikaatioon voi osallistua suuri joukko erilaisia bakteereita, sädesieniä ja sieniä, ja olosuhteiden muuttuessa herkät lajit voivat korvautua kestävämmillä lajeilla.

Nitrifikaatio, jossa ammoniumtyppi hapettuu nitraatiksi, on sen sijaan erittäin lajisidonnainen ilmiö, joka on myös todettu herkäksi happamuuden suhteen. Puut voivat ammoniumtypen ohella käyttää myös nitraattityppeä. Nitrifikaation lisääntyessä nitraatin huuhtoutumisen vaara kasvaa. Toisaalta happamassa metsämaassa, jossa pH on 4,5 tai sitä alhaisempi, nitrifikaatio on vähäistä.

Humuksen happamoitumisen on yleensä todettu vähentävän bakteerien määrää ja aktiivisuutta sekä rajoittavan niiden erilaisia fysiologisia toimintoja. Sienet kestävät hap-

pamuutta yleensä paremmin kuin bakteerit. Hyvin vahva hapan käsittely (pH 2) on kuitenkin selvästi pienentänyt humuksen aktiivisen sienirihmaston biomassaa ja lajimäärää verrattuna lievemmin käsiteltyyn humukseen.

Sienten sopeutumis- ja sietokykyä osoittaa se, että sienirihmaston biomassa on suurempi happamassa kuin emäksisessä ympäristössä. Toisaalta sienirihmaston lisääntyminen happamuuden lisääntyessä johtuu myös muiden mikrobien vähenemisestä, joka taas vähentää kilpailua ravinteista.

Onko kalkituksesta apua?

Kalkitusta on käytetty metsämaan happamuuden torjumiseen. Varsinkin humuskerroksessa kalkituksen happamuutta vähentävä vaikutus on ollut todettavissa vielä jopa 25 vuotta kalkituksen jälkeen (luku 3.5 *Maanhoidollisin keinoin voidaan ehkäistä happamoitumista,* s. 68). Kalkitus on lisännyt myös humuskerroksen orgaanisen aineen määrää, mutta ei merkittävästi parantanut sen hiili/typpi-suhdetta.

Biologinen aktiivisuus on miltei aina parantunut kalkituksen jälkeen, vaikka bakteerien kokonaismäärä ei olisikaan muuttunut. Sen sijaan aktiivinen osa sienirihmastosta näyttää reagoivan negatiivisesti kalkitukseen. Tämä ilmiö saattaa osittain selittää niitä tutkimustuloksia, jotka osoittavat karikkeen hajonneen hitaammin kalkituilla koealoilla kuin käsittelemättömillä.

Kalkituksen vaikutus voi johtua suoraan pH-arvon noususta tai kalsiumin lisääntymisestä tai välillisesti muutoksista muiden ravinteiden saatavuudessa ja mikrobiston keskinäisessä kilpailussa.

Mikrobimäärät erilaisilla kasvupaikoilla

Hapan laskeuma vaikuttaa ensimmäiseksi metsämaan pintakerroksiin ja siellä elävään mikrobistoon. Kasvukauden säätila vaikuttaa myös olennaisesti maan mikrobiologisiin ominaisuuksiin. Tästä syystä ilmansaasteiden ja maan happamoitumisen vaikutusten erottaminen sään aiheuttamista muutoksista edellyttää pitkäaikaista seurantaa luonnonoloissa. Tätä varten vuosina 1987–88 perustettiin neljä koealaa, joilla selvitetään humuskerroksen mikrobistoa ja kemiallisia ominaisuuksia (taulukot 3 ja 4).

Länsi-Suomessa sijaitsevat koealat edustavat yleisimpiä metsätyyppejä, käenkaali-mustikkatyyppiä (OMT), mustikkatyyppiä (MT), puolukkatyyppiä (VT) ja kanervatyyppiä (CT).

Metsämaan pintakerroksen happamoitumisherkkyys riippuu mm. sen puskuriominaisuuksista. Puskurikapasiteetti määräytyy maan orgaanisen aineen ja hienomaan

Taulukko 3. Humuskerroksen keskimääräinen paksuus, pH, kokonaistyppipitoisuus ja hiili/typpi-suhde (C/N) tarkasteltavilla koealoilla v. 1987.

Metsätyyppi	Humusk.(cm)	pH	N, mg/g	C/N
OMT	4	4,1	13,1	30
MT	4	4,0	11,7	28
VT	5	4,0	12,7	32
CT	2	3,7	8,1	41

Taulukko 4. Humuskerroksen mikrobiologisia ominaisuuksia sääoloiltaan poikkeavina vuosina tarkasteltavilla koealoilla. Mikrobimäärät on esitetty lukumäärien logaritmeina.

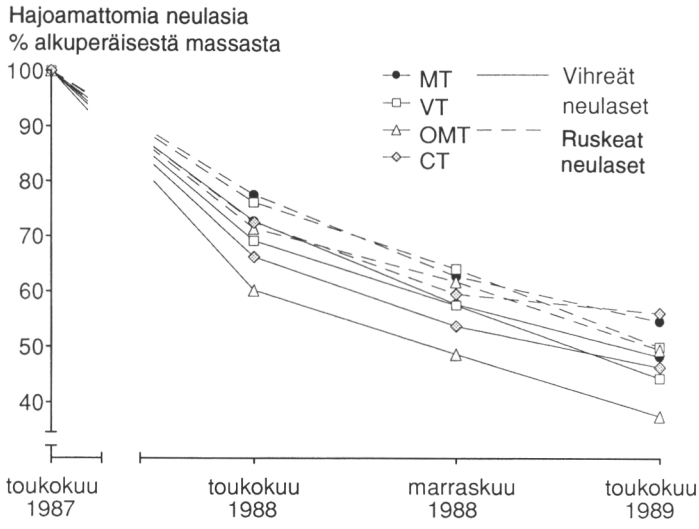
Metsä-	1987			1988			
tyyppi	pmm	amm	r	pmm	amm	r	ar
OMT	7,6	5,9	6000	7,9	5,6	3600	500
MT	7,4	5,4	5000	6,7	4,9	3400	400
VT	7,8	5,8	4400	7,9	5,4	3200	300
CT	7,3	5,3	2600	6,8	4,6	2300	400

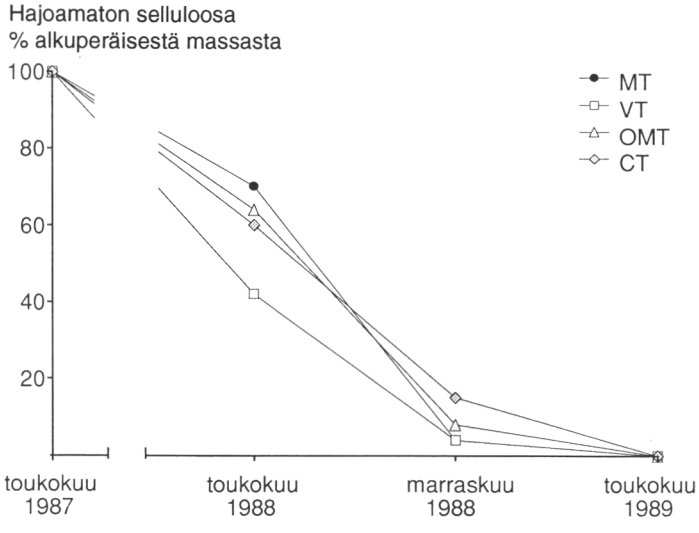
pmm = pesäkkeitä muodostavien bakteerien määrä
amm = ammonifioivien l. ammoniumtypen kiertoon osallistuvien bakteerien määrä
r = sienirihmaston kokonaispituus (m/g humusta)
ar = aktiivisen sienirihmaston pituus (m/g humusta)

osuuden perusteella. Karuilla kankailla, joilla on ohut humuskerros, puskurikyky on heikompi kuin viljavilla metsätyypeillä. Hapan kuormitus on oletettavasti voimakkain Tuusulan Ruotsinkylän mustikkatyypin koealalla ja pienin kanervatyypin koealalla Parkanon Hämeenkankaalla.

Neljältä koealalta otettiin säännöllisin väliajoin, toukolokakuun ajan humusnäytteitä välittömästi laboratoriossa analysoitaviksi. Kasvukausi 1988 oli hyvin lämmin ja alkukesä erittäin kuiva vuoteen 1987 verrattuna. Vuonna 1987 bakteereita ja sienirihmastoa oli keskimäärin huomattavasti enemmän ja vaihtelu kasvukauden aikana vähäisempää kuin vuonna 1988 (taulukko 4). Selvitettyjen mikrobiologisten ominaisuuksien suhteen erot olivat eri metsätyyppien välillä molempina vuosina samansuuntaiset; bakteereita ja sienirihmastoa oli keskimäärin eniten viljavimmalla (OMT) ja vähiten karuimmalla metsätyypillä (CT).

Tutkimuksessa selvitettiin myös neulasten ja puhtaan selluloosan hajoamista. Pienisilmäisiin nailonverkkopusseihin punnittiin tietty määrä ruskeita männyn karikeneulasia, eläviä vihreitä neulasia ja selluloosaliuskoja. Karikepussit asetettiin jokaiselle koealalle humuskerrokseen siten, että ne peittyivät ohuella humus- tai karikekerroksella. Kaksi selluloosaliuskaa sisältävät pussit asetettiin siten, että ylempi liuska oli humuskerroksessa ja alempi humus- ja kivennäismaakerroksen rajalla. Hajoamisen ete-



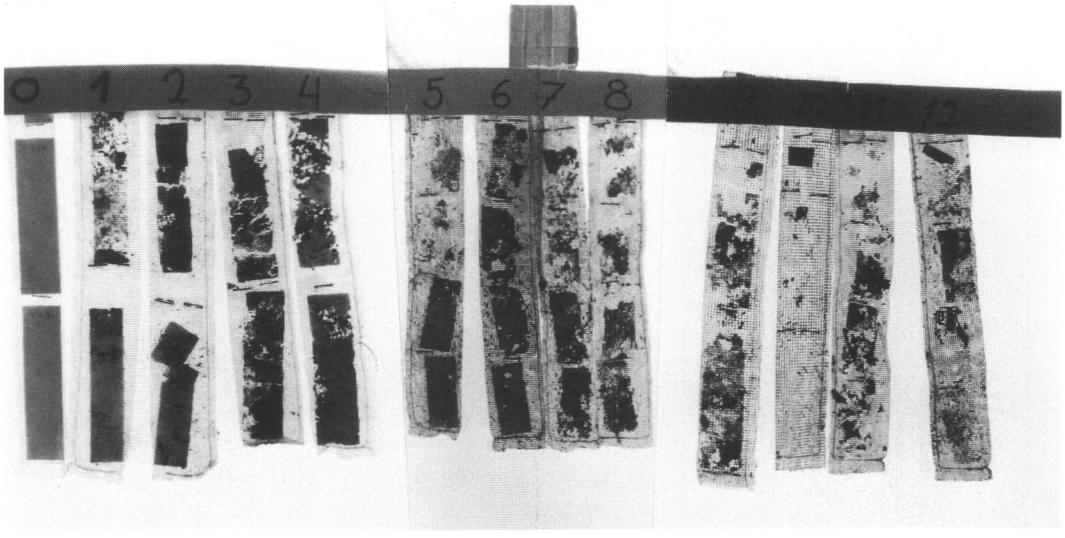


Kuva 23. Männyn neulasten (a) ja puhtaan selluloosan (b) hajoaminen kahdessa vuodessa neljällä eri metsätyyppiä edustavalla koealalla.

nemistä seurattiin nostamalla osa asetetuista pusseista yhden, puolentoista ja kahden vuoden kuluttua. Kuivatuksen jälkeen määritettiin pussien sisällön massan väheneminen.

Kasviaineksen pääkomponenteista ligniini hajoaa hitaammin kuin selluloosa ja hemiselluloosa, jotka taas puolestaan hajoavat hitaammin kuin esimerkiksi sokerijohdannaiset, tärkkelys ja erilaiset proteiinit.

Neulasten massa väheni kokeen alussa nopeasti, mutta aikaa myöten hajotus hidastui helposti hajoavien komponenttien vähetessä (kuva 23). Puhdas selluloosa hajosi lähes täysin jo 1,5 vuodessa (kuva 24). Humus- ja kivennäismaakerrosten rajalla oleva liuska hajosi keskimäärin jonkin verran hitaammin kuin ylempänä humuskerroksessa



Kuva 24. Esimerkki selluloosaliuskoista, joita asetettiin humuskerrokseen ja joita tarkasteltiin 1, 1,5 ja 2 vuoden kuluttua. Liuskojen numerointi: 0 = hajoamaton selluloosa, 1–4 = 1 v., 5–8 = 1,5 v. ja 9–12 = 2 v. kuluttua. Valokuva: Kristina Palmgren.

oleva. Orgaanisen aineen hajotus eteni keskimäärin nopeimmin viljavimmalla ja hitaimmin karuimmalla metsätyypillä.

Tarvitaan todennäköisesti monen tekijän yhteisvaikutus ennen kuin jokin selvä muutos mikrobiston koostumuksessa ja toiminnassa on todettavissa. Aika on näistä tärkeimpiä. Toisaalta mikrobit pystyvät tunnetusti mukautumaan hyvin elinympäristönsä muutoksiin. Ilmeisesti ympäristömuutokset heijastuvat myös mikrobien määrään ja lajistoon, eivätkä muutokset aina välttämättä ole haitallisia koko metsäekosysteemin ravinnekierron ja hyvinvoinnin kannalta.

Aiheesta enemmän

Palmgren, K. 1984. Muokkauksen ja kalkituksen aiheuttamia mikrobiologisia muutoksia metsämaassa. Folia Forestalia 603. 23 s.

Palmgren, K., Brenner, T. & Vainio, A. 1990. Microbiological and chemical properties of the forest humus layer at four sites in southern Finland. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag, s. 351–372.

3.3 Metsämaan happamoitumistilanne Suomessa

Kangasmaiden happamoituminen

Suomen metsämaiden viljavuutta, happamoitumista ja maannostumista on tutkittu jo 1920-luvulta lähtien. Viljavuuden pääpiirteet on selvitetty valtakunnan metsien inventoinneissa, ja kangasmaiden happamoitumista ja maannostumista on tutkinut puolestaan V.T. Aaltonen 1930- ja 1940-luvuilla. Aaltosen mukaan podsolimaannos (ks. 1.4 *Metsämaa,* s. 22 ja kuva 11, s. 23) on vallitseva maannostyyppi Suomessa, ja "mikäli maannostumisessa on vaihteluita, on kysymys pääasiallisesti podsoloitumisen voimakkuudesta". Aaltonen erottaa huuhtoutumiskerroksen eli E-horisontin paksuuden ja rapautuneisuuden perusteella neljä maannostumisaluetta, joista kaksi voidaan edelleen jakaa nuoren ja vanhan maan alueisiin — rajana on Litorinameren rantaviiva.

Huuhtoutuneinta maan pintaosa on Aaltosen mukaan Pohjois-Suomessa ja korkeilla alueilla, ja toisaalta Etelä-Suomen metsämaat ovat happamampia kuin Pohjois-Suomen metsämaat, nuoret maat ovat happamampia kuin vanhat maat ja edelleen hietamaat happamampia kuin hiekkamaat. Aaltosen tutkimia havaintopisteitä ei kuitenkaan merkitty pysyvästi maastoon, joten kehitystä niissä ei ole voitu seurata.

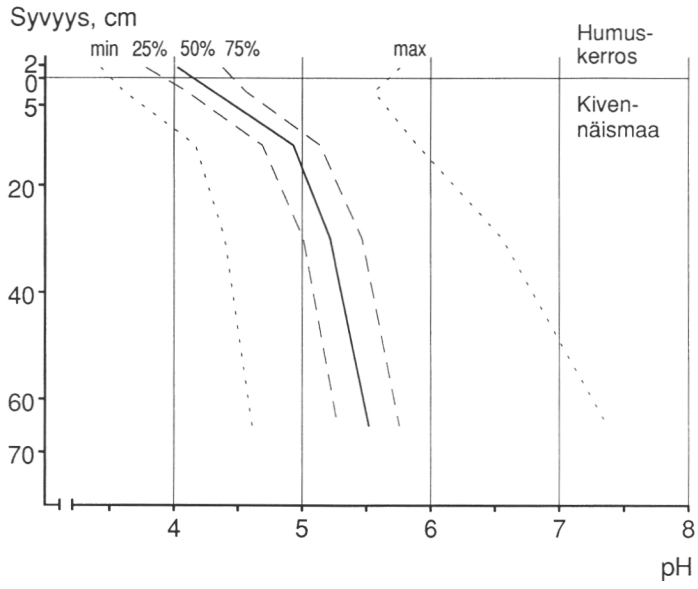
Metsäntutkimuslaitoksen ILME-projektissa kerättiin inventointikoealoilta (ks. liite 1) myös maanäytteitä koko maasta, jotta voitaisiin arvioida metsämaiden nykyinen happamoitumistilanne ja siihen vaikuttavat tekijät, erityisesti ilmansaasteiden osuus.

Kangasmaan koealoilta kerättiin näytteet viidestä maakerroksesta (humuskerros ja kivennäismaakerrokset 0–5, 5–20, 20–40 ja 60–70 cm:n syvyydellä), ja kaikista kerätyistä näytteistä on määritetty happamuus.

Happamuus

Suomen metsämaat näyttävät olevan joitakin poikkeuksia lukuunottamatta kohtalaisesti happamoituneita. Happamuus vaihtelee kuitenkin melkoisesti (kuva 25). Alhaisimmat mitatut pH-arvot olivat humuskerroksessa 3,4 ja kivennäismaassa 0–5 cm syvyydessä 3,6. Metsämailla on mitattu näitäkin alempia arvoja: humuskerroksessa pH 3,2–3,3 ja kivennäismaassa pH 3,3–3,4. Poikkeustapauksissa, rannikoiden sulfaattipitoisilla alunamailla, pH voi laskea jopa alle arvon 2,5.

Humuskerroksen pH-arvo kuvastaa varsin hyvin kasvupaikan viljavuutta. pH on keskimäärin korkeampi viljavilla kasvupaikoilla (lehdoissa ja lehtomaisilla kankailla)



Kuva 25. Happamuuden vaihtelu eri maakerroksissa. Pisteviivalla on rajoitettu pH:n vaihteluväli. Katkoviivojen väliin osuu puolet näytteistä. Yhtenäinen viiva kuvaa näytteiden keskimääräistä pH-arvoa (mediaani).

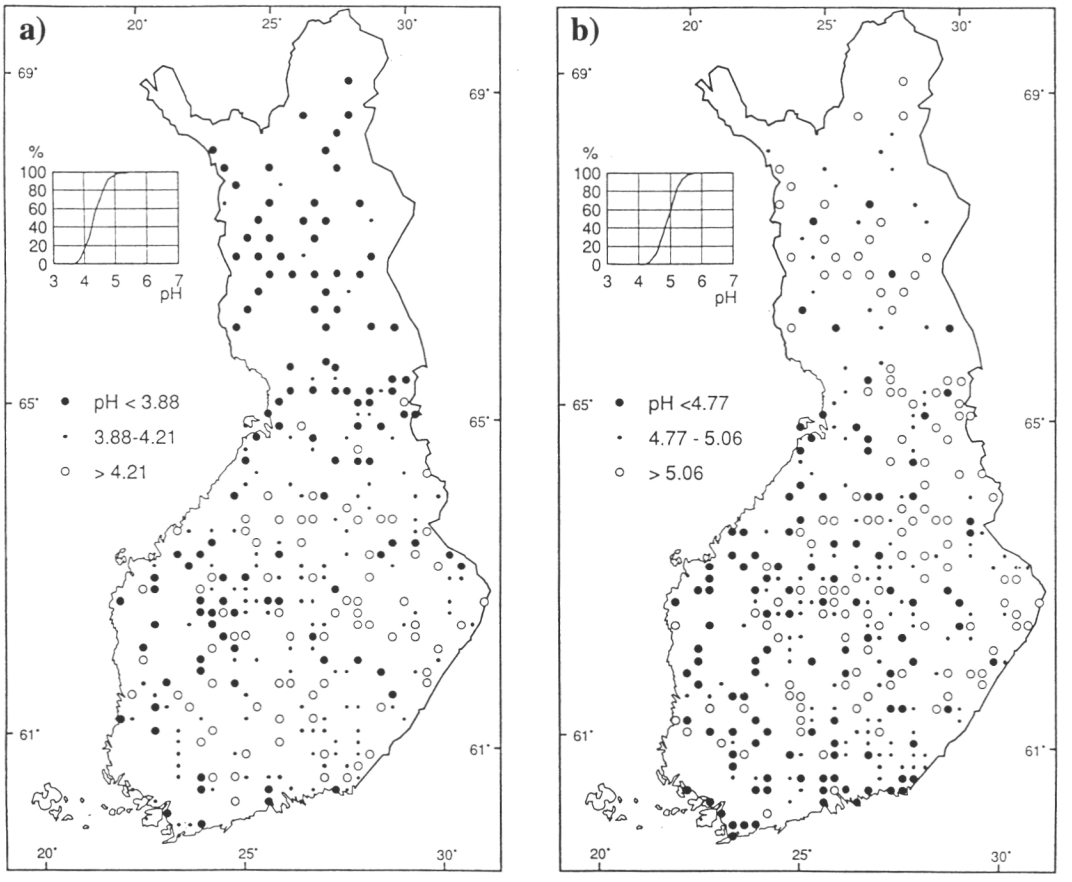
nuorissa ja lehtipuuvaltaisissa metsissä sekä hienorakeisilla mailla. Humuskerroksen pH-arvoa alentavat mm. humuskerroksen paksuus, havupuiden, etenkin kuusen, suuri osuus ja puuston ikä.

Kivennäismaan happamuuden vaihtelusta maata ja kasvupaikkaa kuvaavat tunnukset selittävät vain 15–30 %, mutta humuskerroksen happamuuden vaihtelusta noin 40 %. Hienorakeiset kivettömät kivennäismaat ovat keskimääräistä vähemmän happamia. Kivennäismaan happamuutta lisäävät puolestaan humuskerroksen paksuus ja soistuneisuus sekä kuusen suuri osuus puustosta.

Metsämaan happamuus vaihtelee myös alueittain. Humuskerros on vähiten hapanta Etelä- ja Itä-Suomen viljavilla alueilla ja happaminta Pohjois- ja Länsi-Suomessa (kuva 26). Sen sijaan kivennäismaan happamuus ei vaihtele alueellisesti yhtä selvästi, sen pintaosa näyttää kuitenkin olevan Etelä-Suomessa happamampaa kuin Pohjois-Suomessa. Tämä voi johtua esimerkiksi Etelä-Suomen metsien olennaisesti suuremmasta biomassan tuotosta, joka sitoo runsaasti emäskationeja, Etelä-Suomen kivennäismaiden suuremmasta orgaanisen aineen määrästä sekä mahdollisesti lämpimämmän ilmaston aiheuttamasta nopeammasta rapautumisesta.

Alumiini

Happamuuden kasvu voi lisätä liuenneiden alumiini-ionien (Al^{3+}) määrää maassa. Liukoinen alumiini on kasveille haitallista, koska se häiritsee kasvien aineenvaihduntaa. Maan pintaosissa alumiini on sitoutunut pääasiassa orgaanisiin yhdisteisiin.



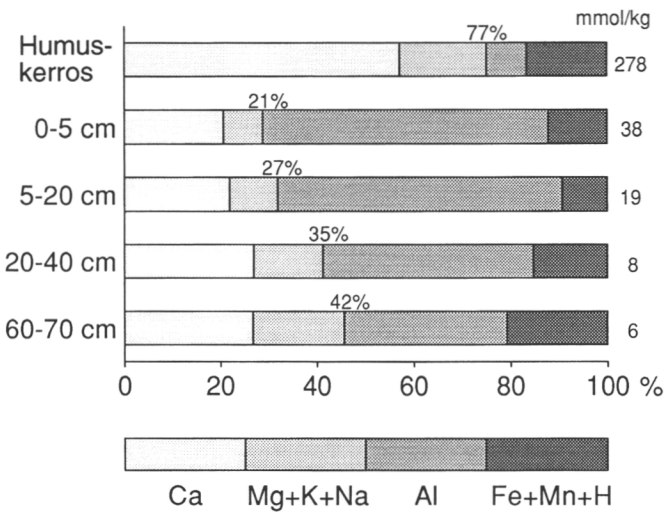
Kuva 26. (a) Humuskerroksen ja (b) kivennäismaan (5–20 cm maan pinnasta) happamuus. Kartat perustuvat 384 koealan maanäytteisiin.

Liukoista alumiinia on eniten kivennäismaan pintakerroksessa 0–5 cm syvyydessä. Alumiinin kokonaismäärä (liukoinen ja sitoutunut alumiini) on sen sijaan suurin rikastumiskerroksessa (5–20 cm) ja pienin huuhtoutumiskerroksessa (0–5 cm). Liukoisen alumiinin määrään maassa vaikuttaa lähinnä maan happamuus, eikä alumiinin kokonaismäärä.

Emäskationit

Happamien ja emäksisten ionien osuudet maassa ja niiden keskinäiset suhteet kuvaavat maaperän ekologisia ominaisuuksia paremmin kuin yksittäisten kationien määrät. Emäskationien suhteellinen osuus on suurin humuskerroksessa, jossa myös pääosa puiden ohutjuurista kasvaa, ja pienin kivennäismaan pintaosissa (kuva 27). Vaikka kivennäismaan pintaosa vaikuttaakin epäedullisen happamalta, siinä on kuitenkin määrällisesti enemmän ravinteita kuin syvemmissä kivennäismaakerroksissa.

Etelä-Suomessa kahden tärkeän kationin, kalsiumin ja alumiinin, suhde (Ca/Al) oli keskimäärin tyydyttävä eli



Kuva 27. Kationinvaihtokapasiteetti (mmol/kg) ja tärkeimpien kationien osuudet eri maakerroksissa. Prosenttiluvut osoittavat emäskationien osuuden kationinvaihtokapasiteetista eli emäskyllästysasteen.

yli 1, mutta 10–15 %:ssa pintamaanäytteistä alle 0,1. Tällöin myös maan puskurikyky happamoitumista vastaan on heikentynyt.

Raskasmetallit

Suomessa on eräitä, suhteellisen pienialaisia raskasmetallien saastuttamia alueita, mm. Harjavallan, Raahen ja Tornion seudut. Näitä lukuunottamatta Etelä-Suomen kangasmaat ovat keskimäärin melko vähän saastuneita (taulukko 5). Todettujen raskasmetallipitoisuuksien merkitystä on kuitenkin vaikea arvioida, koska maaperän geokemiallinen koostumus vaihtelee alueittain, eri tutkimuksissa maanäytteet on otettu erilaisista kerroksista ja määritysmenetelmät ovat olleet erilaisia.

Taulukko 5. Humuskerroksen raskasmetallipitoisuudet (mg/kg) Etelä-Suomessa.

	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn
			mg/kg			
Keskimäärin	0,4	7,2	6,5	4,8	37	52
Vaihteluväli	0–1,6	2,7–41	3,5–19	0–12,9	24–69	20–162
"Puhdas"maa[1])	<1,0	<30	<15	<10	<60	<100
Kohonneita[2])	2	2	4	2	3	1

[1]) Belgiassa ja Norjassa tehtyjen tutkimusten mukaan.
[2]) Näytteitä, joissa pitoisuudet olivat suurempia kuin puhtaan maan enimmäispitoisuus (näytteitä yhteensä 65 kpl).

Rikki

Metsämaassa rikkiä on sitoutunut orgaaniseen ainekseen ja kivennäismaassa myös alumiini- ja rautayhdisteisiin. Uuttuvaa rikkiä onkin eniten humuskerroksessa, ja kivennäismaassa sitä on suhteellisesti eniten rikastumiskerroksessa. Rikkiä on keskimäärin eniten viljavilla kasvupaikoilla, ja kuusikoissa maa on yleensä rikkipitoisempaa kuin männiköissä.

Etelä-Suomesta kerättyjen 65 humusnäytteen rikkipitoisuuden ja rikkilaskeuman välillä ei ollut selvää yhteyttä. Sen sijaan neulasten ja jäkälien rikkipitoisuuden ja rikkilaskeuman välinen yhteys on huomattavasti selvempi.

Ihmisen vaikutusta happamoitumiseen on vaikea arvioida pelkästään maa-analyysien perusteella. Metsänhoito, puun biomassan korjuu ja ilman saastuttaminen eli ihmisen toiminta kokonaisuudessaan voi vaikuttaa olennaisesti metsämaiden happamoitumiseen.

Aiheesta enemmän

Aaltonen, V.T. 1940. Metsämaa. WSOY. 615 s.

Tamminen, P. & Mälkönen, E. 1986. Kangasmaiden herkkyys happamoitumiselle. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 210. 25 s.

Tamminen, P. & Starr, M.R. 1990. A survey of forest soil properties related to soil acidification in southern Finland. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag, s. 237–251.

Turvemaiden happamoitumisherkkyys ja happamoitumistilanne

Turvemaiden herkkyyttä happaman laskeuman vaikutuksille selvitettiin laboratoriokokeessa, jossa karulla rahkaturpeella, sitä viljavammalla puusaraturpeella ja tuhkalannoitetulla karulla rahkaturpeella täytettyjä näyteastioita sadetettiin 16 kk:n ajan puhtaalla vedellä ja rikkihapolla happamoitetulla vedellä. Happamoitetun kasteluveden pH-arvot säädettiin tasoille pH 4, 3 ja 2. Sadetuksen yhteydessä annettu rikkiannos ja vahvojen happojen annos vastasivat pH 4 tasolla noin vuoden laskeumaa, pH 3 tasolla noin 10 vuoden laskeumaa ja pH 2 tasolla noin 100 vuoden laskeumaa Etelä-Suomessa sekä vesimäärä vuotuista sademäärää (n. 600 mm).

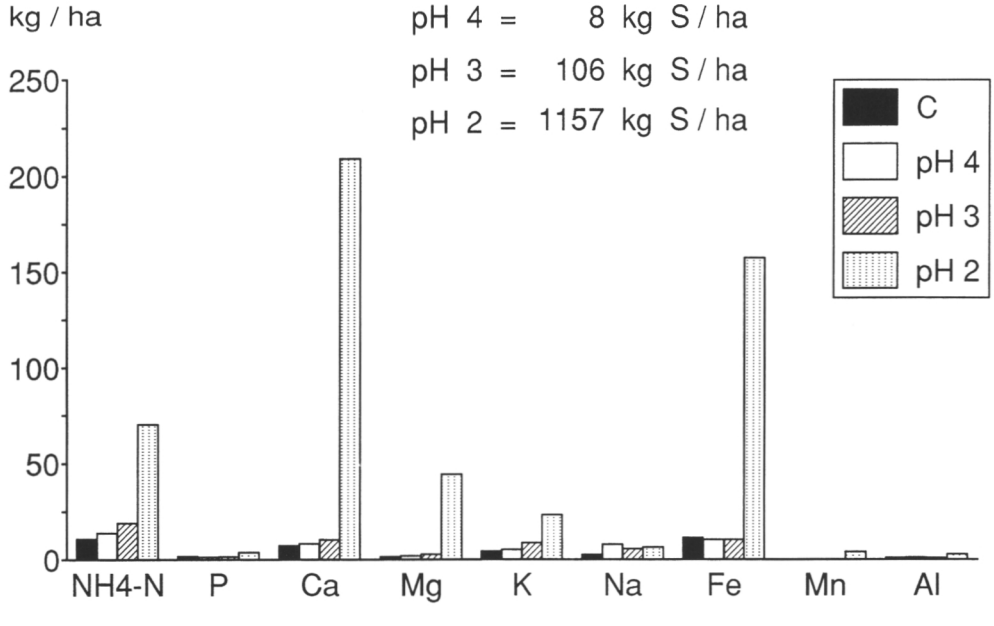
Sadetuskäsittelyjen jälkeen mitattiin turveprofiileista huuhtoutuneet aineet ja lisäksi turveprofiilien sisältämät ainemäärät. Voimakkain happokäsittely (pH 2) johti odotetusti suurimpiin ainehuuhtoumiin turveprofiileista (kuva 28). Puhdas vesi sekä pH-tasoille 4 ja 3 säädetyt sadetusvedet eivät sen sijaan aiheuttaneet toisistaan oleellisesti poikkeavia ainehuuhtoumia, vaikka sadetusveden happamuuden kasvu huuhtoumamääriä jonkin verran lisäsikin.

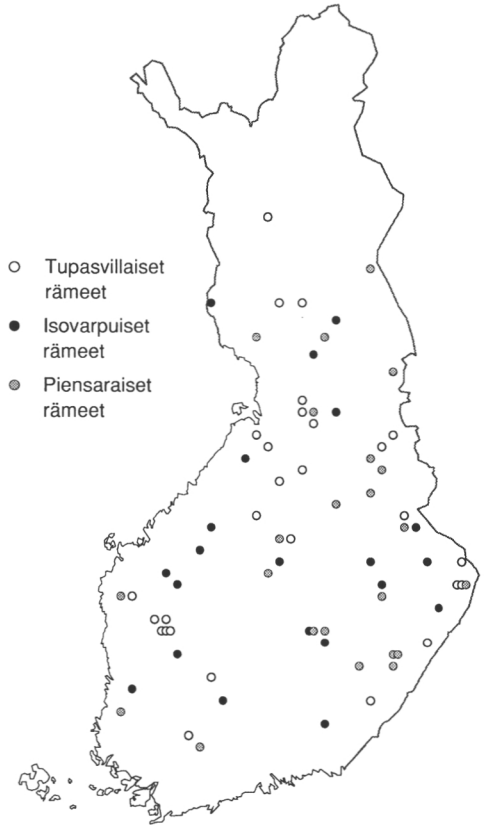
Maan haponsietokyvyn kannalta keskeisten emästen (Ca, Mg, K, Na) huuhtouma rahkaturpeesta oli puhtaalla vedellä käsitellyistä turveprofiileista vain 1,4 % koko profiilin emässisällöstä. Käsittelytasoilla pH 4 ja pH 3 emäshuuhtouma oli myös hyvin vähäistä (2,0 % ja 2,4 %). Vasta käsittelytasolla pH 2 emäshuuhtouma lisääntyi jyrkästi kun rahkaturpeen emässisällöstä huuhtoutui lähes kolmannes. Koe osoitti, että nykyään vallitsevan rikki- ja happolaskeuman aiheuttama emäsravinnehuuhtouma verrattuna turpeen sisältämään emäsmäärään ei ole merkittävä edes karuilla soilla, joilla turpeen emässisältö on suhteellisen pieni.

Laskeuman mahdollisesti aiheuttamia muutoksia karujen, ojitettujen soiden pintaturpeen ravinnesisältöön selvitettiin valtakunnallisen koealaverkoston avulla (kuva 29). Muutosten oletettiin ilmenevän maantieteellisinä eroina Etelä- ja Pohjois-Suomen välillä, koska laskeumamäärät etelässä ovat huomattavasti suuremmat kuin pohjoisessa.

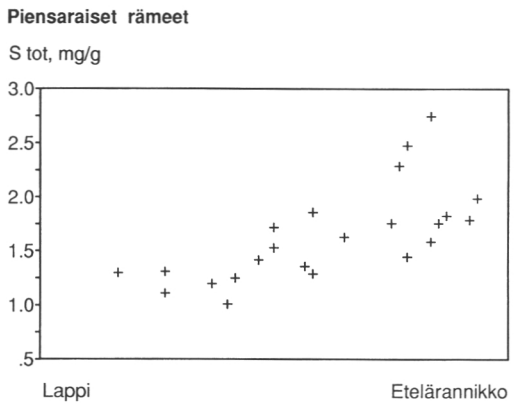
Pintaturpeen (0–5 cm) ravinnesisällössä ilmenikin selviä maantieteellisiä eroja. Turpeen typpi- ja rikkipitoisuus sekä happamuus oli eteläisillä koealoilla suurempi kuin pohjoisessa. Sen sijaan magnesium- ja kaliumpitoisuus oli etelässä pohjoista tasoa alempi. Vaikka osa näistä maantieteellisistä eroista voitaisiinkin tulkita ilmansaasteiden

Kuva 28. Karusta rahkaturpeesta huuhtoutuneet ainemäärät pH-arvoihin 4, 3 ja 2 säädetyillä sadetuskäsittelyillä, C = puhdas vesi.





Kuva 29. Valtakunnallisen koealaverkoston suokoealojen sijainti.



Kuva 30. Piensaraisten rämeiden (ks. kuva 29) pintaturpeen (0–5 cm) rikkipitoisuuden alueellinen jakauma.

aiheuttamiksi, lienee erojen todennäköisin syy soiden alunperin erilainen ravinnesisältö tai erot kuivatustilanteessa, turpeen maatuneisuudessa ja puuston määrissä. Nimenomaan pintaturpeen korkeammat rikkipitoisuudet Etelä-Suomessa maan pohjoisosiin verrattuna voivat ehkä olla rikkilaskeuman aiheuttamia (kuva 30).

Valtakunnalliseen koealaverkkoon perustuvat tulokset vahvistivat myös laboratoriossa saatua tulosta, jonka mukaan jopa karujen soiden pintaturpeen emässisältö on niin suuri, ettei happaman laskeuman aiheuttamalla emäshuuhtoumalla ole merkitystä puiden ravinnetalouden kannalta. Hapanta laskeumaa merkittävämpi emäspoistuma voikin tapahtua luonnonhuuhtouman tai puunkorjuun yhteydessä.

Ahti, E. & Pätilä, A. 1985. Happaman laskeuman vaikutukset turvemaiden ominaisuuksiin. Teoreettinen tarkastelu. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 209. 34 s.

Pätilä, A. 1990. Buffering of peat and peaty soils: Evaluation based on the artificial acidification of peat lysimeters. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 305–324.

Pätilä, A. & Nieminen, M. 1990. Turpeen emäsravinne- ja rikkitase karuilla ojitetuilla rämeillä laskeuma huomioon ottaen. Summary: Base cation nutrients and sulphur status of drained oligotrophic pine mires considering the atmospheric input. Folia Forestalia 759. 16 s.

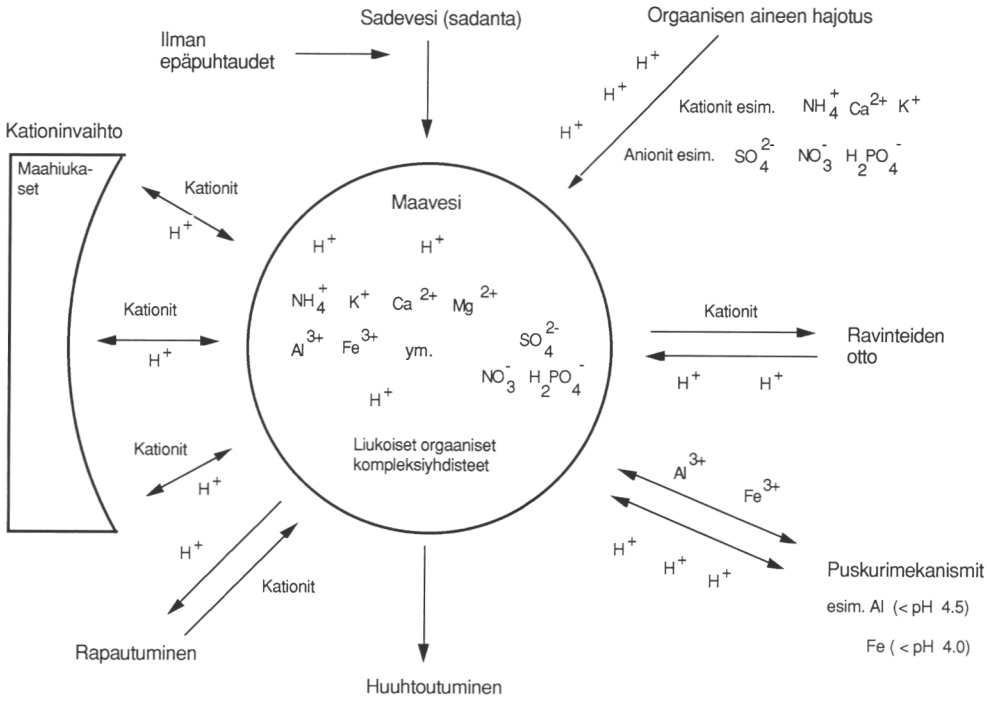
3.4 Happamuuden neutraloituminen maassa

Metsämaa on puskuroitunut happamuuden muutoksia vastaan. Tämä ilmenee mm. siten, että maaveden happamuus muuttuu paljon hitaammin kuin puhtaan veden happamuus happo- tai emäslisäyksen seurauksena. Maaveden happamuutta säätelevät mm. kationinvaihto maahiukkasten ja maaveden välillä, alumiini- ja rautayhdisteet, joiden liukoisuus riippuu happamuudesta, ja mineraalien kemiallinen rapautuminen.

Maaveden happamuus vähenee sitä mukaa kun se vajoaa syvemmälle maahan, koska veden sisältämiä vetyioneja kiinnittyy maahiukkasten pinnoille. Tällöin maa puolestaan happamoituu. Maan happamuus ilmenee mm. kationinvaihtopaikkojen täyttymisenä vetyioneilla ja ns. happamilla metallikationeilla, alumiinilla ja raudalla, sekä maan pintaosien mineraaliaineksen köyhtymisenä metallisten kationien suhteen (kuva 31).

Maan puskurikykyä happamoitumista vastaan voidaan selvittää laboratoriossa maanäytteiden haponneutralointikyvyn perusteella tai maastossa esimerkiksi kastelukokein. Laboratoriossa voidaan mitata häiriintymättömien maapatsaiden läpi suodattuvan happaman veden neutraloitumista tai yksittäisten maanäytteiden kykyä sitoa happoa. Maan happamoituminen ja siihen liittyvä mineraaliaineksen rapautuminen ovat hyvin hitaita tapahtumia, joten niitä ei voida sellaisenaan toistaa kokeissa. Laboratorio- ja kenttäkokeilla saadaan kuitenkin käsitys erilaisten maiden suhteellisesta puskurikyvystä.

Eri kationien osallistumista happamuuden neutraloitumiseen voidaan arvioida kationien tavasta pidättyä maaainekseen. Maavedessä olevat emäskationit eivät voi neut-



Kuva 31. Maaveden koostumukseen vaikuttavat tekijät.

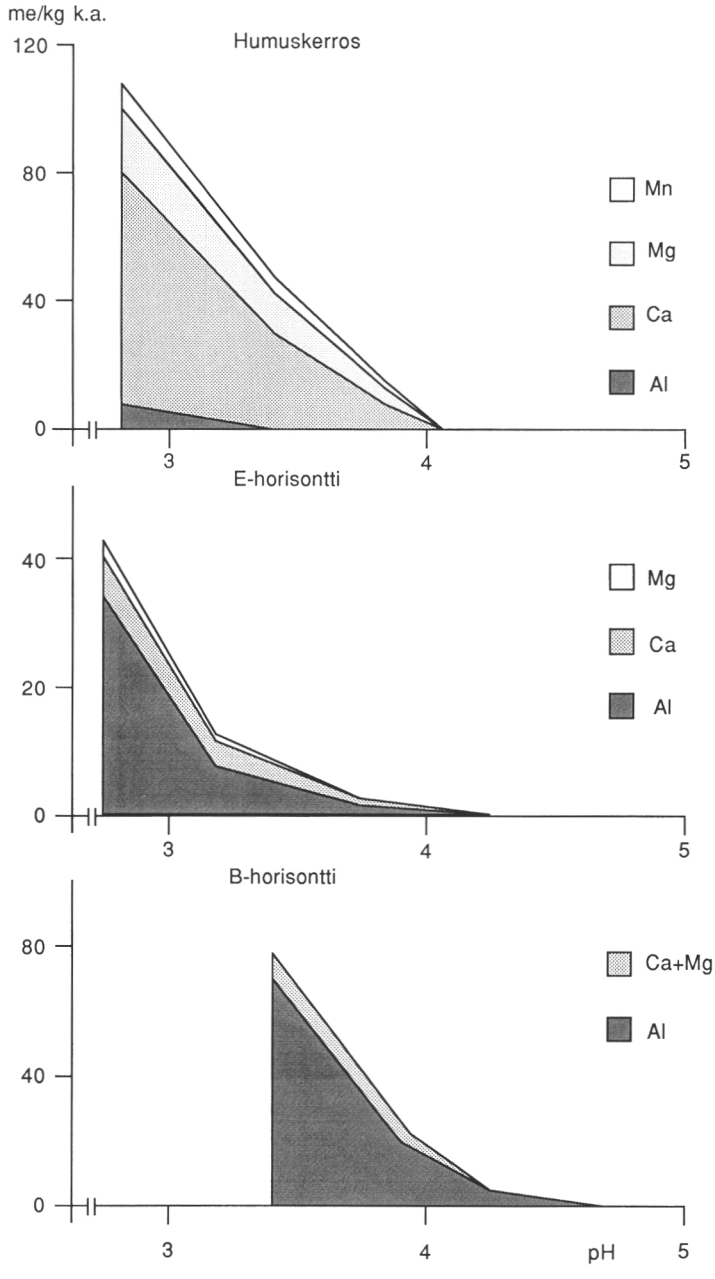
raloida vetyioneja. Sen sijaan maahiukkasten vaihtopaikkoihin kiinnittyneet emäskationit voivat korvautua vetyioneilla, jolloin niiden määrä maavedessä vähenee ja emäskationien määrä vastaavasti kasvaa. Alumiini- ja rautayhdisteet, joiden liukoisuutta happamuus säätelee, voivat myös neutraloida vetyioneja, tosin hitaammin. Hitain veden neutraloitumiseen vaikuttava tapahtuma on kivennäisaineksen rapautuminen.

Maan puskuri- ja neutralointikyky käy luonnossa parhaiten ilmi maaveden ominaisuuksista tarkastelemalla eri syvyyksiltä otettuja vesinäytteitä. Maaveden laatu on kaikkien neutralointitapahtumien lopputulos. Sen ympärivuotista tarkastelua hankaloittavat kuitenkin paitsi lumi, jää ja routa, myös muut näytteenoton tekniset vaikeudet ja analysointivirheille alttiit pienet pitoisuudet.

ILME-projektin yhteydessä tutkittiin eri maakerrosten haponneutralointikykyä (ANC) laboratoriossa käsittelemällä maanäytteitä erilaisilla happomäärillä ja analysoimalla tällöin vapautuvat alkuaineet (kuva 32).

Metallikationien pidättyminen

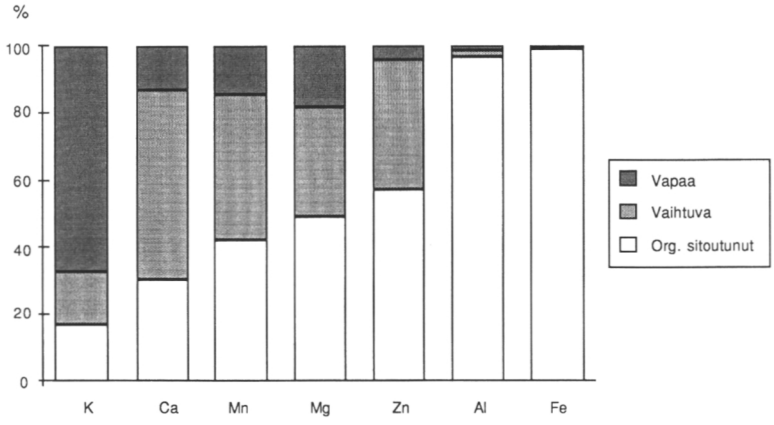
Metallikationien merkitys maaveden happamuuden säätelyssä ja kationien huuhtoutumisherkkyys riippuvat mm. metallikationien tavasta sitoutua maa-ainekseen (kuva 33). Maavedessä vapaana olevat kationit eivät pysty neutraloi-



Kuva 32. Metallikationien vapautuminen lisättäessä happoa maanäytteeseen. Nollataso edustaa näytettä, joka on uutettu puhtaalla vedellä.

maan vetyioneja ja saattavat huuhtoutua helposti, mikäli kasvit eivät ota niitä ravinteina.

Esimerkiksi nyt analysoidussa aineistossa valtaosa humuskerroksen kaliumista oli vesiliukoista, mutta alumiinista ja raudasta vain alle 1 % (kuva 33). Puskurikyvyn kannalta tärkeän vaihtuvan muodon osuus oli humuskerroksessa suurin kalsiumilla, 56 %. Metallikationeista rau-



Kuva 33. Metallien suhteellinen jakautuminen humuskerroksessa orgaanisesti sitoutuneeseen, vaihtuvaan ja maavedessä olevaan vapaaseen muotoon.

ta ja alumiini ovat sitoutuneet lähes kokonaan humuskerroksen orgaaniseen ainekseen. Sen sijaan ravinnekationeista orgaaniseen ainekseen on sitoutunut paljon pienempi osuus, esimerkiksi magnesiumista 47 %, kalsiumista 31 % ja kaliumista vain 17 %.

Ravinnekationien kiinnittymiskyky vaihtopaikkoihin, kun mittana on vaihtuvan ja vapaan muodon suhde, vaihtelee maannoksen eri kerroksissa (taulukko 6). Kaliumin lisäksi myös magnesium näyttää ehkä olevan altis huuhtoutumiselle kivennäismaan horisonteissa.

Maan happamoituminen ilmenee podsoliprofiilin muodostumisena (ks. 1.4 *Metsämaa,* s. 22 ja kuva 11, s. 23). Humuskerroksen alle muodostuu vähitellen huuhtoutumiskerros (E-horisontti), jolle on tyypillistä vaalean värin lisäksi mm. alumiinin ja raudan huuhtoutuminen. Nämä kulkeutuvat alemmas muodostaen saostuessaan rikastumiskerroksen (B-horisontti). Huuhtoutumiskerroksen mineraalien rapautuessa vapautuvat ravinnekationit voivat myös huuhtoutua syvemmälle, mutta osa sitoutuu maahiukkasten vaihtopaikkoihin korvaten vety-, alumiini- ja rautaioneja.

Maan eri kerrosten happoliukoisten alkuaineiden pitoisuudet kuvaavat hyvin maan happamoitumisesta johtuvaa alkuaineiden uudelleenryhmittymistä (kuva 34). Ravinnekationien vapaan ja vaihtuvan muodon osuus kasvaa pohjamaasta huuhtoutumiskerrokseen siirryttäessä ja happoliukoisen osuuden pitoisuudet kasvavat pintakerroksesta syvemmälle siirryttäessä. Tämä kuvaa myös kivennäisaineksen rapautumisastetta eri maakerroksissa.

Alumiini ja rauta käyttäytyvät eri tavoin. Niiden vapaan ja vaihtuvan muodon osuudet ovat hyvin pieniä happoliukoiseen muotoon verrattuna, joten jakauma poikkeaa ravinnekationien jakaumista. Happoliukoinen muoto kuvaa alumiinin ja raudan osalta orgaanisesti sitoutunutta, helposti rapautuvaa sekä huuhtoutumiskerroksesta liuennutta ja syvemmälle saostunutta muotoa. Kuvan 34 mukaan huuhtoutumiskerroksesta on rapautunut ja huuhtoutunut paljon alumiinia ja rautaa, kun taas rikastumiskerroksessa näitä metalleja on enemmän kuin pohjamaassa.

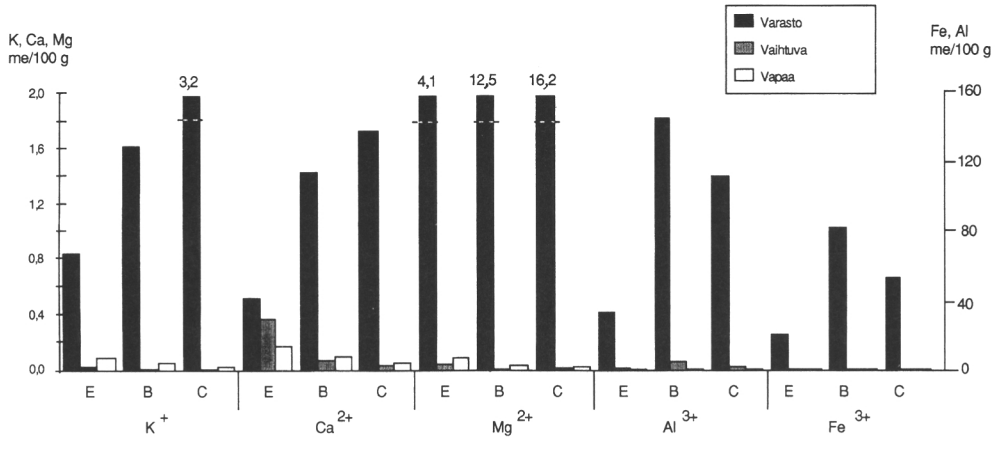
Taulukko 6. Metallikationien kiinnittymiskyky maan kationinvaihtopaikkoihin humus- (O), huuhtoutumis- (E), rikastumis- (B) ja pohjamaakerroksessa (C). Kiinnittymiskyky on arvioitu vaihtuvan ja vapaan muodon pitoisuuksien suhdelukuna.

Kationi	O	E	B	C
		Vaihtuva/vapaa		
K	0,23	0,14	0,16	0,18
Mg	1,81	0,50	0,18	0,36
Mn	2,95	0,62	0,37	–
Ca	4,22	2,05	0,71	0,67
Al	20,2	–	–	–
Fe	24,7	–	–	–

Veden neutraloituminen maassa

Sadevesi tulee metsämaahan kasvillisuuden läpi, jolloin myös veden laatu muuttuu vapaaseen sadantaan verrattuna (ks. *Laskeuma metsiköissä,* s. 40). Vesi muuttuu myös kulkiessaan maakerroksen läpi, jolloin muun muassa veden happamuus vähenee sen vajotessa syvemmälle maahan (taulukko 7). Suurimmat muutokset tapahtuvat humuskerroksessa ja huuhtoutumiskerroksessa (ks. *Metsikön ja puun ravinnekierto,* s. 44). Karkean maan läpi kulkiessaan vesi neutraloituu hitaammin kuin hienorakeisessa maassa. Oheisten taulukoiden koealoista Jokioinen edustaa savimaata, Tuusula karkeaa hietaa ja Parkano karkeaa hiekkaa. Jokioisten koealalla vesi neutraloitui jo 15 cm:n syvyydellä, Tuusulassa 45 cm:n syvyydellä, mutta Parkanossa ei vielä tälläkään syvyydellä.

Kasvien juurten menestymisen kannalta kalsiumin ja alumiinin suhdetta maavedessä pidetään hyvänä tunnuksena. Jos Ca/Al-suhde on alle 0,1, juuret saattavat vaurioi-



Kuva 34. Kaliumin, kalsiumin, magnesiumin, alumiinin ja raudan happoliukoisen, vaihtuvan ja vapaan muodon pitoisuudet kivennäismaan huuhtoutumis- (E) ja rikastumiskerroksissa (B) sekä pohjamaassa (C).

Taulukko 7. Maaveden laatu eri syvyyksillä Parkanon, Jokioisten ja Tuusulan koealoilla v. 1986.

Parkano

Etäisyys maanpinnasta cm	pH	Ca/Al mooli	SO_4 ppm	Näytteitä kpl
15	4,58 (4,55–4,61)	0,4 (0,41–0,44)	18,4 (11,2–25,5)	2
30	4,71 (4,61–4,80)	12,5 (4,1–21,0)	17,2 (9,7–22.3)	4
45	4,75 (4,65–4,82)	3,5 (2,4–6,2)	11,1 (6,9–13,2)	4

Jokioinen

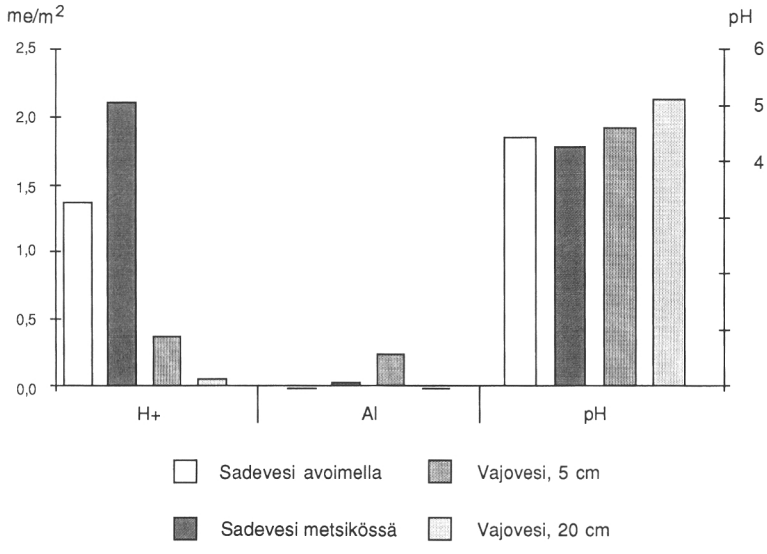
Etäisyys maanpinnasta cm	pH	Ca/Al mooli	SO_4 ppm	Näytteitä kpl
15	5,46 (5,06–5,87)	23,7 (1,7–57,0)	16,7 (11,0–24,1)	24
30	5,42 (5,17–5,95)	38,3 (12,6–62,5)	18,5 (15,8–25,7)	20
45	5,46 (5,18–6,20)	34,8 (1,4–64,1)	18,3 (15,8–23,7)	20

Tuusula

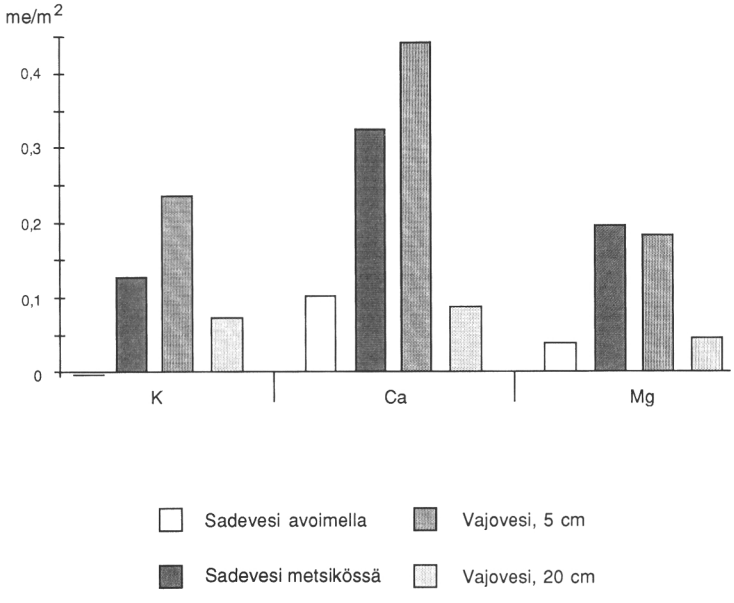
Etäisyys maanpinnasta cm	pH	Ca/Al mooli	SO_4 ppm	Näytteitä kpl
15	4,31 (3,90–4,93)	7,5 (3,1–52,7)	28,7 (17,7–71,6)	40
30	4,77 (4,17–5,36)	7,3 (3,8–18,1)	26,0 (19,2–38,4)	41
45	5,11 (4,42–5,47)	43,2 (3,4–118,8)	29,8 (22,7–39,8)	45

tua, jolloin kasvien veden ja ravinteiden otto voi häiriintyä. Parkanossa suhde oli epäedullisin, mutta kuitenkin yli 0,1, joten kalsiumia on ollut kaikilla paikoilla vähintään tyydyttävästi alumiiniin verrattuna.

Taulukossa 7 on esitetty myös rikin pitoisuudet maavedessä sulfaatiksi laskettuna. Sulfaatti ei anionina sitoudu juuri lainkaan maan kiinteään ainekseen, vaan kulkeu-



Kuva 35. pH, vetyionin ja alumiinin määrät sadevedessä ja vajovedessä Sallan Sätsissä 20.7.–22.9.1989.



Kuva 36. Emäskationien (K, Ca, Mg) määrät sadevedessä ja vajovedessä Sallan Sätsissä 20.7.–22.9.1989.

tuu maannoksen läpi lähes sellaisenaan. Tutkituista koealoista Tuusulassa lienee suurin rikkilaskeuma ja siihen viittaa myös maaveden sulfaattipitoisuus. Sulfaatin haitallisiin ominaisuuksiin maan happamoitumisen ja viljavuuden säilymisen kannalta kuuluu sen helppo liikkuvuus maassa ja kyky viedä mukanaan varaukseltaan vastaava määrä kationeja.

Vajoveden mukana kulkeutuvat ainemäärät riippuvat pitoisuuksien lisäksi vesimääristä. Sallan Sätsistä kerättyjen vesinäytteiden perusteella vesi happamoitui hiukan kulkiessaan puuston latvuston läpi (kuva 35), neutraloitui hiukan humuskerroksessa ja kivennäismaan pintakerrok-

sessa (0–5 cm) ja neutraloitui lähes täysin vajotessaan 20 cm:n syvyyteen. Vetyionimäärät vähenevät kuitenkin vielä nopeammin, koska vajoveden määrä vähenee syvemmälle mentäessä.

Vajoveden alumiinin määrät olivat Sallassa vähäisiä. Pintamaasta huuhtoutui kaliumia melko runsaasti, hiukan kalsiumia, mutta ei mitattavia määriä magnesiumia (kuva 36). Vajoveden mukana huuhtoutui 20 cm:n syvyyteen likimain yhtä paljon ravinnekationeja kuin mitä niitä tuli vapaassa sadannassa, kaliumia kuitenkin enemmän.

Aiheesta enemmän

Derome, J. 1989. Acid-induced aluminium mobilization in Finnish mineral soils. Teoksessa: Kämäri, J., Brakke, D.F., Jenkins, A., Norton, S.A. & Wright, R.F. (toim.). Regional Acidification Models. Springer-Verlag. s. 23–30.

Derome, J. 1990. Maaperän luonnollinen happamoituminen. Teoksessa: Kangasmaiden ominaisuudet ja hoito. Maantutkimuspäivä Kouvolassa 1990. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 370: 5–17.

Tamminen, P. & Mälkönen, E. 1986. Kangasmaiden herkkyys happamoitumiselle. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 210. 25 s.

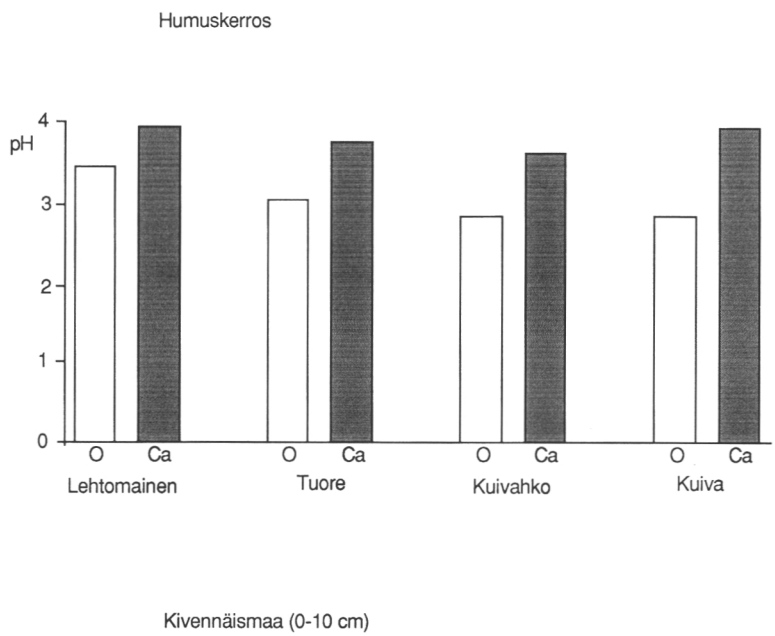
3.5 Maanhoidollisin keinoin voidaan ehkäistä happamoitumista

Ilmansaasteina maahan tulevan happaman laskeuman arvioidaan vähitellen muuttavan ravinteiden saatavuutta siten, että emäskationien (Ca, Mg, K) saatavuus vähenee ja typen saatavuus kasvaa. Maan happamuuden lisääntyessä juurille myrkyllisen alumiinin liukoisuus voi lisääntyä ja samalla vaikeuttaa kasvien veden ja ravinteiden ottoa.

Näitä haittoja voidaan ehkäistä lisäämällä maan haponneutralointikykyä kalkitusaineilla ja turvaamalla tasapainoinen ravinteiden saatavuus lannoitteilla. Lisäksi metsien kasvatuksessa perinteisesti käytetyt maanhoidon menetelmät, kuten kulotus ja lehtipuiden suosiminen sekapuuna havumetsissä, lieventävät maan happamoitumista ja edistävät ravinteiden kiertoa.

Kalkitus

Metsämaiden kalkituskokeita on tehty maassamme jo 1920-luvulta lähtien. Kokeiden tavoitteena on ollut vähentää maan happamuutta, edistää mikrobitoimintaa ja siten nopeuttaa typen ja muiden ravinteiden vapautumista maan orgaanisesta aineesta uudelleen kasvien käytettäviksi.

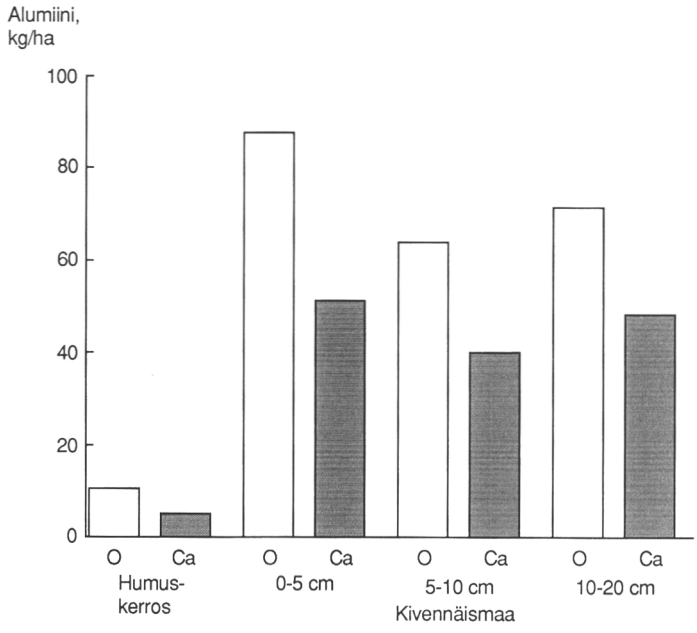


Kuva 37. Kalkituksen vaikutus kangasmaiden humuskerroksen ja kivennäismaan pintaosan (0–10 cm) kokonaishappamuuteen (pH(KCl)) eri kasvupaikkatyypeillä noin 25 vuoden kuluttua kalkituksesta. Kalkituksessa on annettu kalkkikivijauhetta 2000 kg/ha. Merkkien selitykset: 0 = kalkitsemattomat ja Ca = kalkitut koealat.

Maan pH:n nousun lisäksi (kuva 37) kalkitus vaikuttaa muutamien vuosikymmenien ajan myönteisesti muihinkin maan happamuutta kuvaaviin tunnuksiin; se mm. nostaa emäskyllästysastetta ja vähentää vaihtuvan alumiinin määrää maan pintakerroksissa (kuva 38). Kun kalkituksessa on käytetty 2000 kg/ha kalkkikivijauhetta, annetusta kalsiumista on vielä 25 vuoden kuluttua tavattu noin 65 % humuskerroksesta ja 20 cm paksuisesta kivennäismaan pintakerroksesta.

Kangasmaiden lisäksi myös turvemaat pystyvät tehokkaasti pidättämään kalsiumia, kuten 60 vuotta vanhan kalkituskokeen tulokset osoittavat (kuva 39). Dolomiittikalkkia kalkitusaineena käytettäessä parannetaan samalla maan magnesiumvaroja useiden vuosikymmenien ajaksi. Maan happamoitumisen lisääntyessä saattaa magnesiumin riittävyydestä muodostua myös vaikea ongelma.

Kangasmaiden kalkitus vaikuttaa usein maan orgaani-



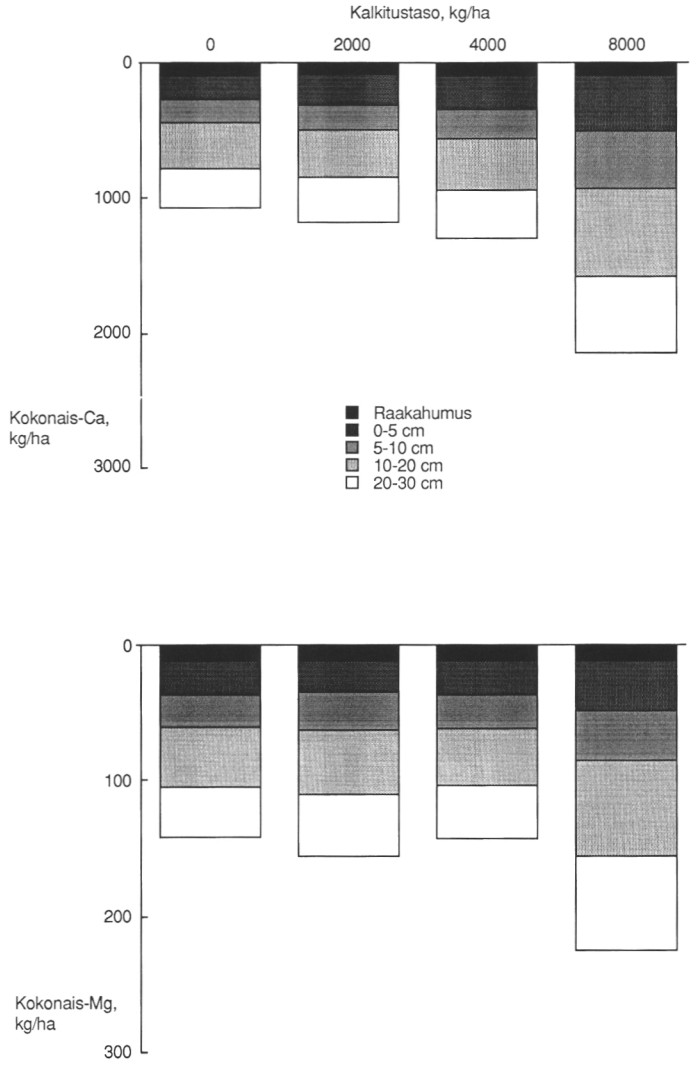
Kuva 38. Kalkituksen vaikutus (2000 kg/ha kalkkikivijauhetta) vaihtuvan alumiinin määrään kangasmaan humuskerroksessa ja kivennäismaan pintaosassa (0–10 cm) noin 25 vuoden kuluttua kalkituksesta. Merkkien selitykset kuvassa 37.

sen aineen määrään, joka on selvästi lisääntynyt humuskerroksessa, mutta vähentynyt kivennäismaan pintaosassa. Turvemailla ilmiö näkyy raakahumuskerroksen muodostumisena ja selvänä paksunemisena. Myös kokonaistypen määrän muutokset eri maakerroksissa ovat olleet samansuuntaisia. Orgaanisen aineen kasaantuminen maahan johtuu ilmeisesti kalkituksen aiheuttamista hajottajamikrobiston ja karikkeen laadun muutoksista.

Turvemailla yksi kalkituksen tärkeimmistä tavoitteista on ollut nopeuttaa turpeeseen sidottujen suurten typpivarastojen mineralisaatiota ja lisätä puille käyttökelpoisen typen määrää. Kenttäkokeiden tulokset eivät kuitenkaan yksiselitteisesti osoita kalkituksen merkittävästi nopeuttavan turpeen hajoamista ja typen mineralisaatiota, ellei kalkkia päästä sekoittamaan turpeeseen.

Maan haponneutralointikyvyn parantumisen ohella kalkituksella on myönteistä vaikutusta happaman laskeuman haittoja ajatellen myös siten, että sulfaattimuodossa kasveille tärkeiden emäskationien huuhtoutumista mahdollisesti edistävää rikkiä sitoutuu kalkituilla metsämailla vaikeasti liukenevaan muotoon.

Tähän mennessä saatujen tulosten mukaan kalkitus ei ole kuitenkaan lisännyt puiden kasvua, vaan kasvu on yleensä vähentynyt pitkäksi aikaa kalkituksen jälkeen. Syitä tähän ei täysin tunneta, mutta kalkituksen on todettu muuttavan voimakkaasti eri mykorritsaryhmien keskinäisiä suhteita, mikä voi vaikuttaa myös puiden ravinteiden ottoon. Lisäksi kalkitus voi sitoa maahan tiettyjä ravinteita, kuten booria, jolloin seurauksena ilmenee ravinnehäiriöitä.



Kuva 39. Kalsiumin ja magnesiumin (kg/ha) jakautuminen turvemaan eri kerroksissa 60 vuoden kuluttua kalkituksesta (0, 2000, 4000 ja 8000 kg/ha dolomiittikalkkia).

Kalkitusaineita voidaan maanmuokkauksen yhteydessä sekoittaa maahan, jolloin vältytään pH:n voimakkaalta nousulta aivan humuskerroksen pinnassa. Metsänviljelykokeiden esitulosten mukaan kalkituksesta (3000 kg/ha) ei tällöin ole ollut haittaa taimikon alkukehitykselle, mutta toisaalta hyötykin on toistaiseksi ollut epävarma.

Kalkituksella voidaan torjua metsämaiden happamoitumista, mutta puiden kasvun ja elinvoimaisuuden parantaminen edellyttää samalla myös tasapainoisen ravinnetalouden turvaamista. Tällaisia kunnostuslannoituksia varten metsiköiden lannoitustarve jouduttaneen useimmiten selvittämään ravinneanalyysien avulla.

Kulotus

Kulotus vapauttaa hakkuutähteisiin, pintakasvillisuuteen ja humuskerrokseen sitoutuneita ravinteita uuden puusukupolven käyttöön. Koska valtaosa puuston sisältämistä ravinteista on sitoutunut latvustoon, joka yleensä jätetään hakkuutähteinä uudistusalalle, kulotuksella saadaan huomattava määrä ravinteita välittömästi kasvien käytettäväksi. Kulotuksen tarkoituksena onkin valmistaa maa metsän uudistamista varten.

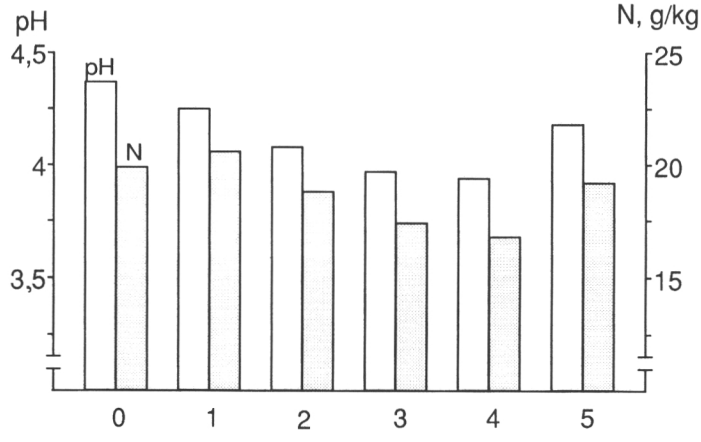
Kulotuksessa palaneen aineen sisältämä typpi vapautuu kaasuna ilmaan, mutta muita ravinteita jää tuhkaan kasvien kannalta lähes ihanteellisissa suhteissa. Orgaanisen aineen sisältämät kivennäisravinteet vapautuvat palaessaan pääosin oksideina tai karbonaatteina, jotka yleensä ovat emäksisiä ja vähentävät siten maan happamuutta jopa muutaman vuosikymmenen ajaksi. Happamuuden väheneminen aktivoi puolestaan maamikrobien toimintaa ja nopeuttaa ravinteiden kiertoa. Emäskationien lisäys on voimakkainta humuskerroksessa heti palamisen jälkeen. Kulotusvuonna humuskerroksen kalsiumin määrän on todettu nousseen kolminkertaiseksi ja magnesiumin määrän kaksinkertaiseksi kulottamattomaan alaan verrattuna.

Maanhoidon menetelmänä kulotuksen käyttöä rajoittaa ravinteiden huuhtoutumisriski. Jos emäskationeja huuhtoutuu merkittävästi kulotuksen jälkeen, menetetään samalla niiden maata neutraloiva vaikutus. Metsänhoidollisesti kulotuksen käyttö on perusteltavissa moreenimaiden tuoreilla ja kuivahkoilla kankailla, joilla ravinteiden huuhtoutumisvaara on pienin.

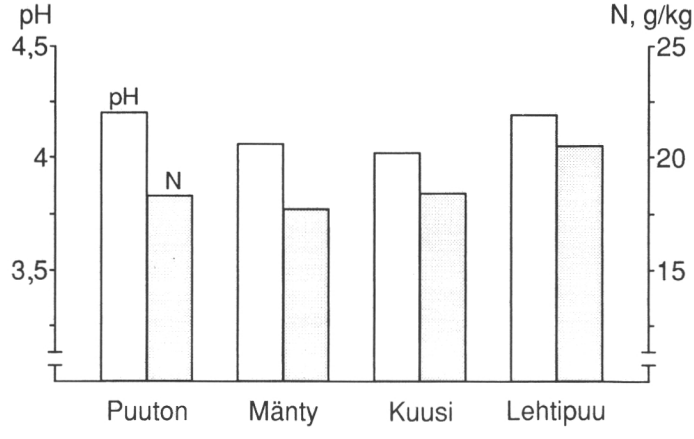
Tuhkalannoitus

Tuhkalannoitus vaikuttaa maan happamuuteen ja ravinteisuuteen samansuuntaisesti kuin kulotus. Vielä melko nuorissa kangasmaiden tuhkalannoituskokeissa puuntuhka (3000 kg/ha) on vähentänyt selvästi humuskerroksen happamuutta. Toistaiseksi senkään ei ole havaittu vaikuttaneen puuston kasvuun.

Ojitetuilla soilla puuntuhka lisää voimakkaasti puuston kasvua, ja sillä voidaan korjata jopa vaikeita ravinnehäiriöitä. Lannoituksessa käytetyt tuhkamäärät ovat olleet 2000–16 000 kg/ha. Tuhka sisältää runsaasti emäs- ja hivenravinteita, mutta ei typpeä. Tuhkalannoitus parantaa puiden ravinnetasapainoa, vähentää turvemaiden pintakerrosten happamuutta ja lisää maan emäskyllästysastetta. Ilmansaasteista mahdollisesti aiheutuvien ravinnehäiriöiden torjuntaan ja korjaamiseen puuntuhka soveltuu erittäin hyvin. Tuhkalannoituksen yleistyminen edellyttää kuitenkin nykyistä taloudellisemman tuhkan talteenotto-, kuljetus- ja levitystekniikan kehittämistä.



0 = aukea ja siemenpuusto, 1 = taimikko, 2 = nuori,
3 = varttunut kasvatusmetsä, 4 = uudistuskypsä,
5 = suojuspuusto.



Kuva 40. Humuskerroksen pH ja typpipitoisuus laskevat puuston ikääntyessä. Lehtipuusto parantaa ja havupuusto heikentää maan viljavuutta (Tamminen 1989).

Lehtipuiden suosiminen

Puulajit voivat muuttaa maan kemiallisia ja biologisia ominaisuuksia tuottamansa karikkeen ja juuristojensa välityksellä. Puulajivalinnalla on siten myös mahdollista vaikuttaa maan happamoitumiskehitykseen.

Puuston tuottaman karikkeen määrällä ja laadulla on suuri merkitys metsämaan luontaisessa happamoitumisessa, koska karikkeen hajotessa syntyvät erilaiset orgaaniset hapot vaikuttavat ratkaisevasti maannoksen kehittymiseen (ks. 1.4 *Metsämaa,* s. 22). Havumetsissä humuskerroksen pH, typpi-, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet laskevat puuston ikääntyessä (kuva 40). Varttuneissa leh-

timetsissä humuskerros sisältää enemmän ravinteita kuin havumetsissä, joten havupuusto heikentää ja lehtipuusto parantaa maan viljavuutta.

Havumetsissä on maanhoidon vuoksi syytä suosia lehtipuita sekapuuna aina, kun se on mahdollista. Myös ylitiheiden metsien harventaminen ja yli-ikäisten metsien uudistaminen lieventävät metsämaan luontaista happamoitumista ja pitävät yllä maan viljavuutta.

Aiheesta enemmän

Derome, J., Kukkola, M. & Mälkönen, E. 1986. Forest liming on mineral soils. Results of Finnish experiments. National Swedish Environmental Protection Board. 3084: 1–107.

Derome, J. & Pätilä, A. 1990. Alleviation of forest soil acidification through liming. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 1093–1116.

Lipas, E. 1990. Kalkituksen aiheuttama boorinpuute kangasmaan kuusikossa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 352: 1–22.

Lipas, E. 1990. Kalkituksen vaikutus ravinteiden saatavuuteen. Teoksessa: Kangasmaiden ominaisuudet ja hoito. Maantutkimuspäivä Kouvolassa 1990. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 370: 49–60.

Silfverberg, K. & Hotanen, J.-P. 1989. Puuntuhkan pitkäaikaisvaikutukset ojitetulla mesotrofisella kalvakkanevalla Pohjois-Pohjanmaalla. Folia Forestalia 742. 23 s.

Tamminen, P. 1989. Mitä on viljavuus? Metsä ja Puu 10: 22–23.

4. Latvuksen kunto ja puun elinvoimaisuus

4.1 Puiden elinvoimaisuuden arvioiminen

Puiden elinvoimaisuus eli vitaliteetti voidaan määritellä niiden kykynä säilyä hengissä, kasvaa ja tuottaa lisääntymiskykyisiä jälkeläisiä. Elinvoimaisuuteen vaikuttavat sekä puun perinnölliset ominaisuudet että kasvupaikan ympäristötekijät, kuten kasvupaikka, ilmasto, luontaiset tuhonaiheuttajat ja ihmisen toiminta. Elinvoimaisen puun elämänkaaressa siemenestä kehittyy eri kasvuvaiheiden kautta lisääntymiskykyinen aikuinen, joka selviää kilpailusta metsikön muiden puiden kanssa (kuva 41). Puut reagoivat lajista, ikävaiheesta ja kasvupaikasta riippuen eri tavoin ulkoisiin stressitekijöihin.

Luonnossa yksilöiden välinen muuntelu saman lajin sisällä on suurta. Terveinä ja elinvoimaisina pidetään usein vain tuuhealatvuksisia, hyvin kasvavia puita. Kuitenkin saariston tai pohjoisen tuntureiden kitukasvuiset puut ovat esimerkkejä levinneisyysalueensa rajoille sopeutuneista yksilöistä. Mitä lähempänä levinneisyysalueensa rajoja puu kasvaa, sitä herkemmin sen elinvoimaisuus heikkenee esimerkiksi ilmansaasteiden vuoksi. Erityisesti maamme pohjoisosien luonto on haavoittuva kaikille lisästressiä aiheuttaville tekijöille.

Kuntotunnuksia eri tarkoituksiin

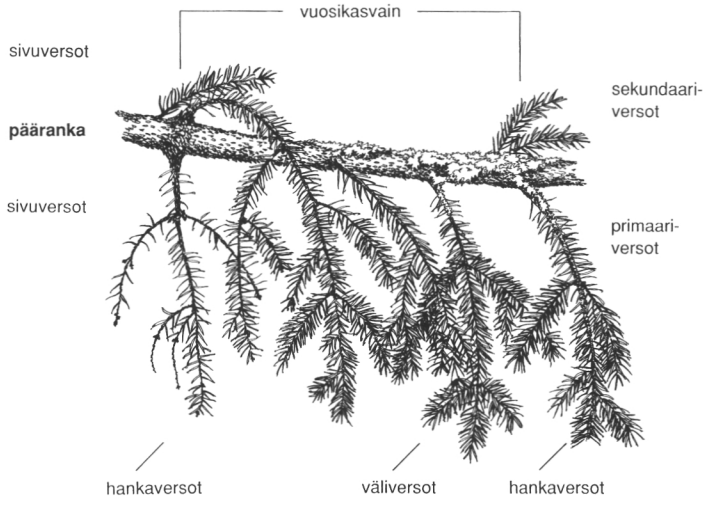
Arvioitaessa puiden elinvoimaisuutta on pyrittävä löytämään sellaisia tunnuksia, jotka mahdollisimman herkästi ja monipuolisesti kuvaavat puiden tilaa, esimerkiksi yh-

Kuva 41. Luonnontilaisissa metsissä suurin osa siemenistä kehittyneistä puuyksilöistä kuolee joko taimivaiheessa tai myöhemmin puiden välisen kilpailun tai jonkin tuhon takia. Hengissä säilyneet taimet kasvavat nopeasti varjostavan aluskasvillisuuden yläpuolelle ja valtaavat kasvutilaa latvukselleen ja juuristolleen. Se edellyttää tehokasta yhteyttämistä sekä vastustuskykyä tuholaisia ja stressitekijöitä vastaan. Neulasmassa, kasvu, lisääntymiskyky ja monet muut ominaisuudet vaihtelevat puun iän mukaan. Tämä näkyy myös puun ulkoasussa. Vanhemmiten puun neulasmassa ja kasvu alkavat vähentyä ja koko puu muuttuu rapistuneen näköiseksi. Piirros: Ilkka Taponen.

teyttämis- ja kasvukykyä. Tällaisina mittoina voidaan käyttää esimerkiksi neulasten tai lehtien määrää ja sen vaihtelua (harsuuntuminen, neulasvuosikerrat), puiden rapistumista ilmentäviä tunnuksia (oksatuhot, sekundaariversot, rungon pihkavuoto), neulasten värivikoja ja hedelmällisyyttä (käpyjen määrä). Puiden elinvoimaisuutta kuvastavat myös niiden kasvu (luku 2. *Metsien kasvu*, s. 30) sekä sieni-, eläin- ja abioottisten tuhojen esiintyminen (luku 5. *Metsätuhojen esiintyminen*, s. 127). Nämä tunnukset ilmentävät vain puiden ulkoista kuntoa, ja niitä käytetään laajojen metsäalueiden terveydentilan selvityksissä.

Puiden elinvoimaisuus heijastuu myös neulasten ravinnetilassa, puun aineenvaihdunnassa sekä muutoksina neulasten pintavahoissa tai solujen rakenteessa. Näiden tutkiminen on työlästä ja hidasta, eikä niitä toistaiseksi voida käyttää laajojen metsäalueiden tilan selvittämiseen. Usein kuitenkin ilmansaasteiden vaikutukset voidaan havaita neulasten alkuainekoostumuksessa (ks. *Neulasten kemiallinen koostumus elinvoimatunnuksena*, s. 92) tai solumuutoksina (luku 4.3 *Ilmansaasteiden vaikutukset neulasten solurakenteeseen*, s. 119) jo ennen näkyvien oireiden ilmestymistä. Nämä tunnukset auttavatkin ennakoimaan vakavia vaurioita. Myös ilmansaasteiden vaikutusmekanismeja tai eri tuhonaiheuttajien vuorovaikutuksia tutkittaessa tarvitaan näitä puiden sisäisestä tilasta kertovia tunnuksia.





Kuva 42. Kuusen oksan rakenne. Primaariversot kasvavat oksan päärangan nivelkohtien tai nivelvälien hankasilmuista. Leposilmuista saattaa kehittyä useita vuosia primaariversojen syntymisen jälkeen sekundaariversoja eli hätäoksia. Ne kasvavat yleensä oksan päärangan yläpuolelle yksittäin tai pieninä pensasmaisina ryhminä. Niitä voi syntyä myös sivuoksiin. Puun vanhetessa sekundaarioksat lisääntyvät, koska puu korvaa niiden avulla harsuuntumisessa menettämiään neulasia. Tämän takia sekundaariversoja kutsutaan hätäoksiksi. Niiden avulla kuusi pystyy uusimaan yhteyttävää neulasistoaan ja säätelemään voimavarojensa käyttöä. Ravinteiden ja veden kuljetusmatka hätäversoihin on lyhyempi kuin kärkisilmuihin, eivätkä oksan yläpinnan versot kärsi varjostuksesta yhtä paljon kuin oksien alaosat. Piirros: Ilkka Taponen.

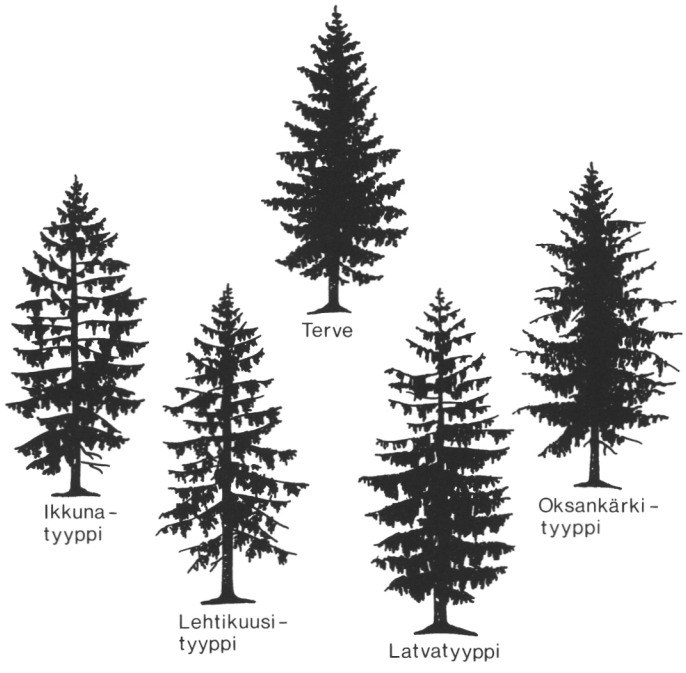
Latvustunnukset ja puun kasvu elinvoimaisuuden ilmentäjinä

Neulasissa tai lehdissä tapahtuvat monet puiden keskeisistä elintoiminnoista kuten yhteyttäminen ja haihdutus. Latvuksen kunto vaikuttaa myös puiden kykyyn kuljettaa ravinteita ja yhteyttämistuotteita. Yhteyttävän neulas- tai lehtimassan muutokset vaikuttavat rungon nestevirtauksiin ja kasvuun, juuriston toimintaan sekä ravinteiden liikkumiseen ja varastointiin.

Puiden elinvoimaisuuden heikentyessä esimerkiksi ilmansaasteiden, sääolojen tai tuhojen takia niiden neulas- tai lehtimassa usein vähenee. Hyväkuntoiset puut toipuvat yleensä entiselleen epäsuotuisan kauden jälkeen, mutta huonokuntoisten yksilöiden ylimääräinen neulas- tai lehtikato voi johtaa vakavampaan näivettymiseen ja jopa kuolemaan. Neulasten tai lehtien määrää voidaankin käyttää kuvaamaan puun yleistä terveydentilaa. Neulasmassan muutokset eivät suoraan kerro elinvoimaisuuden heikkenemisen syitä, ja siksi neulasmassaa käytetään kuntotunnuksena yleensä yhdessä muiden elinvoimatunnusten kanssa. Esimerkiksi neulasten värioireet antavat lisätietoa latvuksen kunnosta.

Harsuuntuminen

Harsuuntumisella tarkoitetaan neulas- tai lehtikatoa, joka muuttaa latvuksen harsuksi eli vähäneulasiseksi tai harvalehtiseksi. Harsuuntuminen voi johtua puiden ikääntymisestä, kasvupaikan ominaisuuksista, ilmastosta, säistä, sieni- ja hyönteistuhoista tai ihmisen toiminnan vaikutuk-



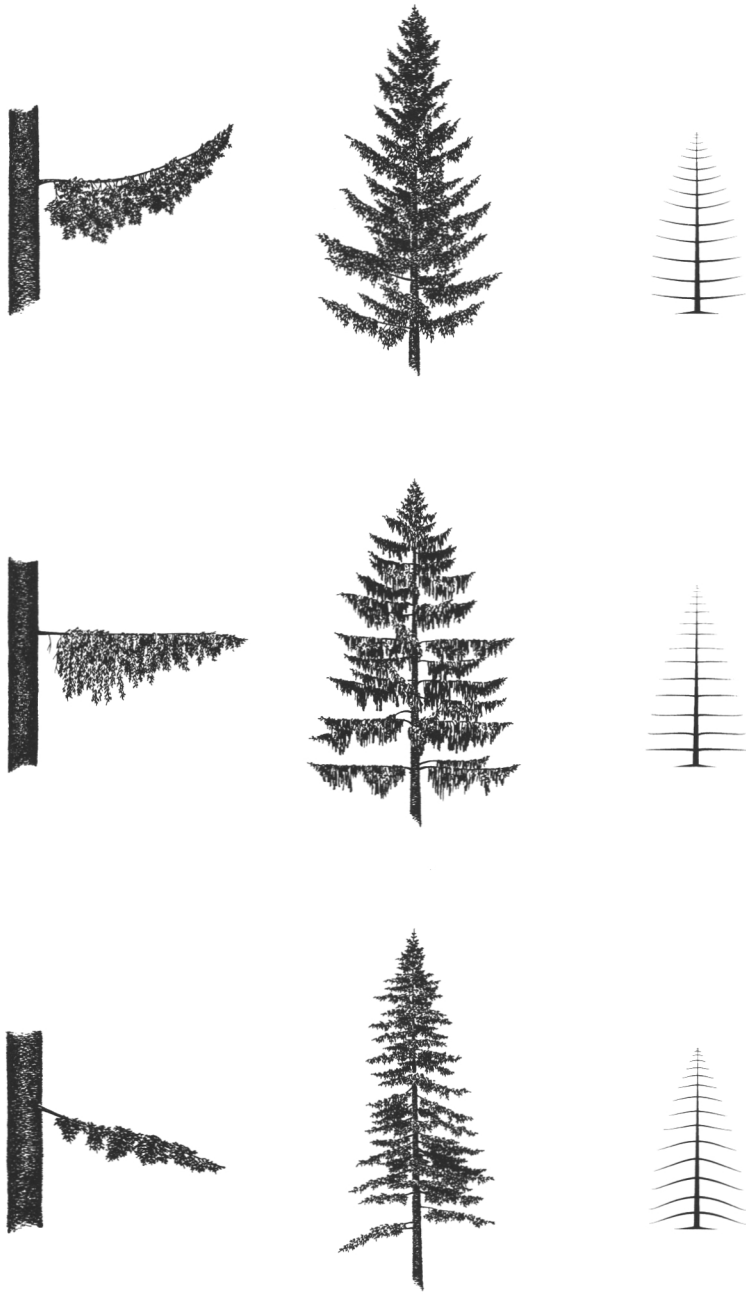
Kuva 43. Kuusen harsuuntumistyypit.
Ikkunatyypin harsuuntumisessa latvuksen yläosaan, muutama metri latvan alapuolelle syntyy neulaseton aukko. Aukko on selvin lähellä runkoa. Se laajenee harsuuntumisen edetessä ylös- ja alaspäin sekä kohti oksien kärkiä.
Lehtikuusityypissä neulasia varisee tasaisesti koko latvuksesta lukuunottamatta aivan latvuksen yläosaa. Oksat muuttuvat nauhamaisiksi ja litistyneiksi sivuversojen katkeilun ja hätäversojen muodostumisen takia.
Latvatyypissä latvan kärki kuivuu ja vähitellen latvuksen koko yläosan kunto heikkenee.
Oksankärkityyppi, jossa harsuuntuminen alkaa oksien kärjistä ja etenee latvuksen sisäosiin, on harvinaisempi. Esimerkiksi keväthallojen aiheuttama uusien vuosikasvainten paleltuminen näkyy myöhemmin kesällä paljaina oksankärkinä. Neulasia varisee oksien kärjistä myös sienitautien seurauksena. Piirros: Ilkka Taponen.

sesta, esimerkiksi ilmansaasteista. Tämän vuoksi harsuuntumista pidetään puiden yleistä terveydentilaa kuvaavana tunnuksena. Havupuiden neulaset altistuvat ilmansaasteille useiden vuosien ajan ympäri vuoden, mutta lehtipuut puolestaan uudistavat lehvästönsä vuosittain. Puun harsuuntuessa latvus muuttuu neulasten tai lehtien varisemisen sekä oksien kuolemisen ja katkeilun takia harvaksi ja valoa helposti läpäiseväksi.

Kuusen harsuuntuessa elävät silmut vähenevät ja leposilmuista kehittyy ns. hätä- eli sekundaariversoja (kuva 42). Voimakkaasti harsuuntuneissa puissa neulasvuosikertoja on vähän, ja rungon paksuus- ja pituuskasvu alkaa vähentyä. Pituuskasvun hidastuminen muuttaa latvan kärjen pyöristyneeksi.

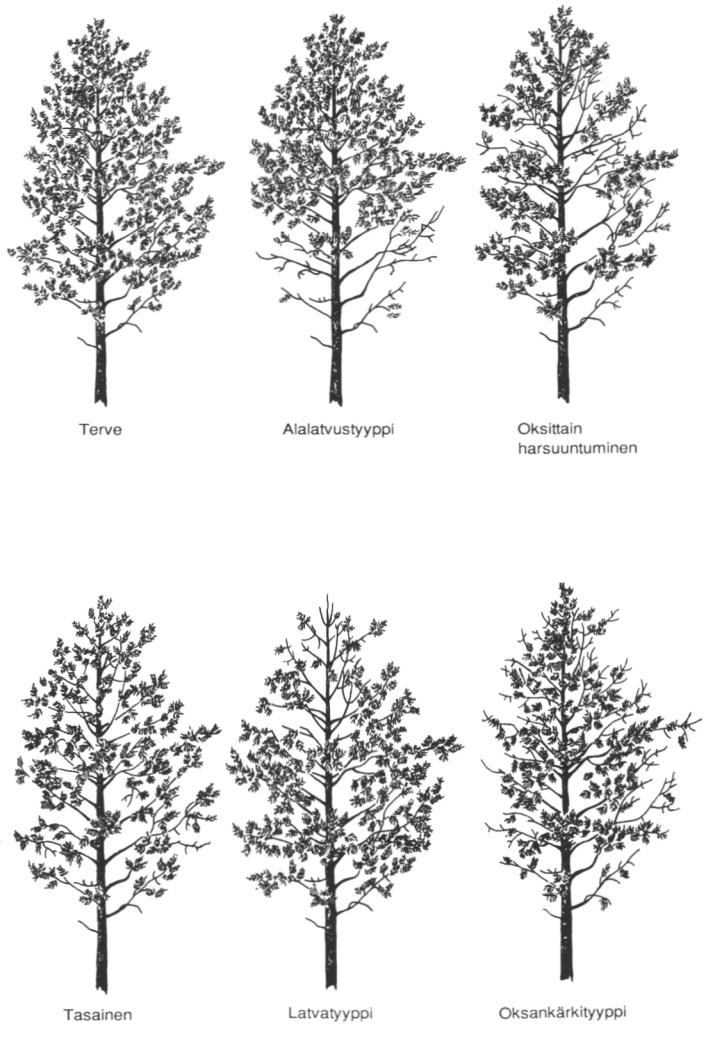
Kuusen yleisimmät harsuuntumistyypit ovat ikkuna-, lehtikuusi-, latva- ja oksankärkityyppi, jotka jaotellaan neulaskadon alkamiskohdan ja etenemisen mukaan (kuva 43). Myös tyyppien välimuodot ovat tavallisia. Harsuuntumisen alkuvaiheessa harsuuntumistyypit ovat tavallisesti selviä, mutta voimakkaasti harsuuntuneista puista voi löytää kaikkien tyyppien piirteitä.

Kuusen perinnöllisesti määräytyvä latvustyyppi vaikuttaa harsuuntumisen ilmenemiseen (latvustyypit, ks. kuva 44). Kampa- ja harjakuusissa oksistoon syntyy aukkoja sivuversojen katkeillessa. Varsinkin kampakuusen latvus muuttuu roikkuvien sivuversojen katkeillessa harvaksi ja aukkoiseksi. Laakakuusen harsuuntumista on vaikeampi havaita, koska oksat ovat leveitä ja litteitä; selviä aukkoja ei synny, vaikka harsuuntuminen olisikin runsasta.



Kuva 44. Kuusen latvustyypit. Kuusen oksamuotojen, sivuversojen haaroittumistavan ja oksakulman perusteella voidaan erottaa erilaisia latvustyyppejä, joista tavallisimmat ovat harjakuusi, kampakuusi, laakakuusi, nauhakuusi ja huiskilokuusi.
Harjakuusessa on runsaasti sivuversoja, jotka suuntautuvat eri suuntiin harjamaisesti. Oksien päärangat kasvavat rungosta yläviistoon ja oksan kärki kaartuu ylöspäin.
Kampakuusen sivuversot ovat melko pitkiä ja roikkuvat suoraan alaspäin. Oksa on kärkeen asti suora.
Laakakuusen oksat ovat litteitä, leveitä ja monihaaraisia. Oksat kasvavat tavallisesti rungosta alaviistoon.
Kuusen latvustyyppi on helpointa tunnistaa keski-ikäisten tai vanhojen puiden latvuksen puolivälistä. Etelä- ja Keski-Suomessa harjakuusi on yleisin, myös kampakuusi on tavallinen ja laakakuusiakin tavataan. Pohjois-Suomessa ovat kapealatvaiset laaka-, nauha- ja huiskilokuuset yleisimpiä. Yleisimmin kuusen latvus on eri tyyppien välimuoto.
Piirros: Ilkka Taponen.

Männyn harsuuntumisessa ei voida erottaa yhtä selviä tyyppejä kuin kuusella (kuva 45). Harsuuntuminen voi alkaa vanhimpien neulasvuosikertojen tasaisella varisemisella koko latvuksesta, mutta se saattaa myös kohdistua vain yksittäisiin oksiin, joiden paljaat rangat säilyvät pitkään latvuksessa. Harsuuntuminen saattaa edetä myös alhaalta ylöspäin, jolloin alaoksien kuollessa latvus supistuu. Joskus mänty harsuuntuu ensin oksien kärjistä. Latvan yläosan on todettu harsuuntuneen ilmansaasteille pit-



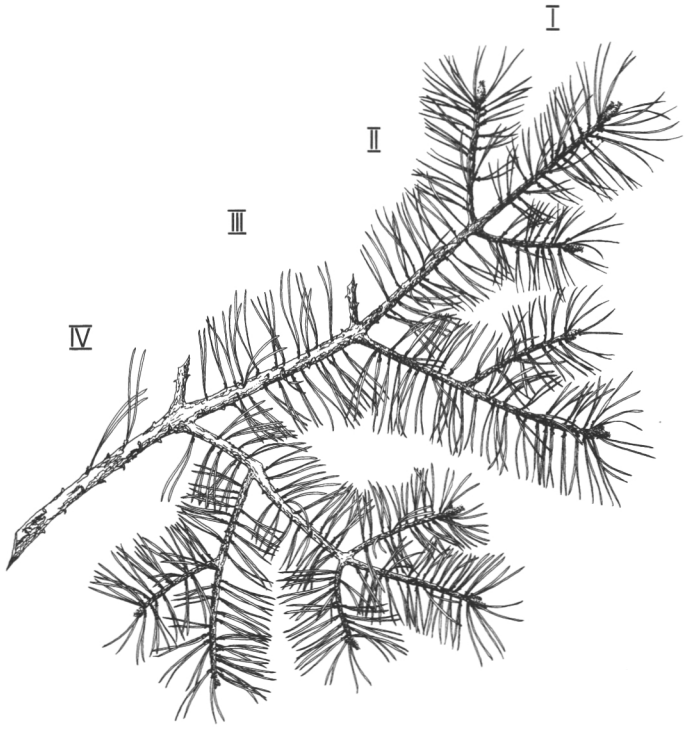
Kuva 45. Männyn harsuuntumistyypit. Alalatvustyypissä harsuuntuminen alkaa alaoksilta ja elävän latvuksen raja nousee korkeammalle. Versosurma vaikuttaa usein tällä tavoin. Oksittaisen harsuuntumisen seurauksena latvuksessa näkyy kuolleita oksanrankoja ja aukkoja. Tasainen harsuuntuminen muuttaa koko latvuksen valoa läpäiseväksi. Hedekukinnan aiheuttamat neulasettomat oksanosat eivät ole harsuuntumista. Latvatyypissä latvan kärki kuolee ja harsuuntuminen etenee alaspäin. Oksankärkityypille ovat ominaista paljaat oksankärjet, mikä voi olla seurausta nuorimpien neulasten paleltumisesta tai sienitaudeista. Piirros: Ilkka Taponen.

kään altistuneissa männyissä, tällöin harsuuntumisraja on epäselvä. Latvan yläosan selvärajaisen kuivumisen aiheuttaa yleensä tervasroso-sieni.

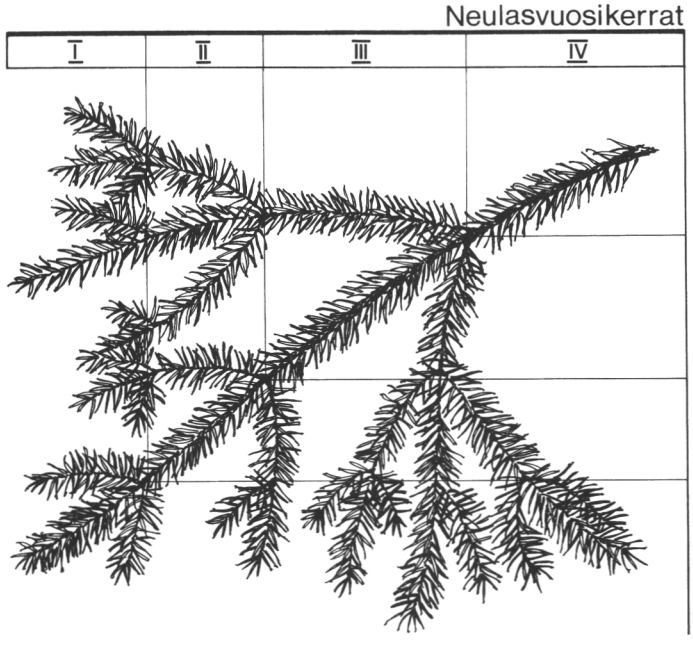
Neulasvuosikerrat

Männyn ja kuusen neulaset säilyvät puussa useita vuosia. Neulasten elinikä riippuu mm. puun perinnöllisistä ominaisuuksista ja iästä, kasvupaikasta sekä ennen kaikkea maantieteellisestä sijainnista. Suomessa neulasten elinikä kasvaa pohjoista kohden.

Vanhimpien neulasten vuosittainen variseminen on luonnollinen ilmiö, joka mahdollistaa yhteyttävän neulasiston uudistumisen. Mänty varistaa neulasiaan yleensä selvästi ikäluokan kerrallaan siten, että vanhin ikäluokka kellas-



Kuva 46. a) Männyn neulaset ovat pareittain kääpiöversoissa. Varisseet neulaset voidaan laskea arpikyhmyjen perusteella. Uusi verso saa alkunsa päätesilmusta, jonka silmusuomujen jäänteet osoittavat vuosikasvaimen rajakohdat. Samana kesänä syntyneet neulaset muodostavat vuosikerran. Täydeksi neulasvuosikerraksi luetaan kasvain, jossa vähintään puolet neulasista on jäljellä. Kuvassa täysiä neulasvuosikertoja on kolme, ja vanhimmat oksassa kiinni olevat neulaset ovat 4-vuotiaita. Piirros: Ilkka Taponen.



Kuva 46. b) Kuusen neulaset kiinnittyvät johteisella lehtikannalla versoon. Puutuneet lehtikannat jäävät neulasten varistua kasvaimeen. Myös kuusen vuosikasvaimet voidaan erottaa silmusuomujen jäänteiden avulla, mutta väliversot ja leposilmuista syntyneet versot sekä kärkisilmujen "jurominen" vaikeuttavat vuosikasvaimen iän määritystä. Kuvassa on kuusen oksankärjen haarautuminen yksinkertaistettu siten, ettei vuosikasvaimien keskiosiin muodostuvia väliversoja ole piirretty näkyviin. Piirros: Ilkka Taponen.

tuu, ruskettuu ja varisee elo-syyskuussa. Kuusikin varistaa ensin vanhimpia neulasiaan mutta ei yhtä selvästi ikäluokittain kuin mänty, vaan samanaikaisesti useasta vanhimmasta vuosikasvaimesta (kuva 46). Kokonaiset sivuversot ja oksat, varsinkin varjossa kasvavat alalatvuksen oksat, saattavat kuusella ruskettua ja menettää kerralla kaikki neulasensa. Kuusen neulasia varisee myös ympäri vuoden, eniten kuitenkin kevättalvella ja myöhäissyksyllä.

Suurin osa neulasista varisee ruskeana, mutta neulaskarikkeessa on myös vihreitä neulasia. Ne voivat olla peräisin katkenneista oksista, tai sitten ne ovat varisseet latvuksesta vihreinä, mikä on haitallista puun ravinnetaloudelle.

Puissa on vähiten neulasia talviaikaan, kun vanhimmat neulaset ovat jo varisseet. Eniten neulasia on heinä-elokuussa uuden vuosikasvaimen kehityttyä. Neulasellisia kasvaimia eli neulasvuosikertoja on männyllä eniten latvuksen yläosassa, kuusella latvuksen puolivälissä ja kummallakin lajilla vähiten alalatvuksessa.

Miten neulasmassan vaihtelua tutkitaan?

Puun yhteyttävä neulas- tai lehtimassa voidaan määrittää joko suoraan punnitsemalla tai epäsuorasti puun kokosuhteiden tai latvuksen valon läpäisevyyden avulla. Välillisesti neulasmassan muutoksia voidaan tutkia myös karikkeen eli puista varisseiden neulasten avulla (ks. *Säät vaikuttavat männyn neulasten varisemiseen,* s. 96).

Käytännössä puiden neulasmassaa ja sen muutoksia arvioidaan tavallisesti silmävaraisesti maastossa, kuten esimerkiksi harsuuntuneisuuden tai neulasvuosikertojen määrä arvioidaan kasvavista puista. Puun elinikäistä neulasvuosikertojen määrän kehitystä voidaan selvittää ns. johtojännemenetelmällä (ks. *Johtojännemenetelmällä saadaan tietoa neulasvuosikerroista puun koko elinajalta,* s. 97).

Harsuuntuneisuuden arviointi

Latvuksen harsuuntuneisuus arvioidaan kiikareiden avulla ylimpien latvuskerrosten puista (ylispuut, valtapuut ja lisävaltapuut, ks. kuva 47). Harsuuntuneisuus arvioidaan kuusesta elävän latvuksen ylemmästä puoliskosta, männystä ja lehtipuista taas elävän latvuksen ylimmästä 2/3-osasta (kuva 48). Kuusen harsuuntuneisuutta arvioitaessa otetaan huomioon myös latvustyyppi. Naapuripuiden piiskauksen tai männyn hedekukinnan tai tervasroson aiheuttamaa neulaskatoa ei lueta harsuuntuneisuudeksi.

Harsuuntuneisuus ilmaistaan suhteellisena neulas- tai lehtikatona verrattuna samalla kasvupaikalla kasvavaan



Kuva 47. Metsikön puut erilaistuvat vallitseviksi latvuskerroksiksi (pää- ja lisävaltapuut) ja vallituiksi latvuskerroksiksi (väli- ja aluspuut). Lisäksi erotetaan ylispuut ja alikasvos. Harsuuntuminen arvioidaan vallitsevien latvuskerroksien ja ylispuiden latvuksista, jotka eivät ole kärsineet varjostuksesta ja kilpailusta niin paljon kuin hidaskasvuisemmat vallitut puut. Piirros: Ilkka Taponen.

todelliseen tai kuviteltuun, samanikäiseen harsuuntumattomaan puuhun (taulukko 8; *Kuusen ja männyn harsuuntumissarja,* s. 220–221). Pohjoismaissa harsuuntuneena pidetään puuta, jonka suhteellinen neulas- tai lehtikato on yli 20 %; tällöin puun oletetaan alkavan kärsiä neulasten tai lehtien menetyksestä. Saksalaisessa luokituksessa 10–25 % harsuuntuneisuutta pidetään lievästi haitallisena.

Harsuuntuneisuuden arviointi on hyväksytty kansainväliseksi, YK:n alaisten ympäristöohjelman (UNEP) ja Euroopan talouskomission (ECE) asiantuntijoiden suosittelemaksi metsävaurioiden kartoitusmenetelmäksi, ja sitä käytetään 30 Euroopan maassa vuosittain (Euroopan metsävauriotilanne: ks. *Metsien harsuuntuneisuus Euroopassa 1989* s. 116). Suomessa harsuuntuneisuutta on arvioitu vuodesta 1985 lähtien.

Taulukko 8. Harsuuntuneisuutta eli suhteellista neulas- ja lehtikatoa arvioitaessa käytetään kymmenen prosentin harsuuntumisluokkia.

Luokka	Neulas- tai lehtikato, %	Harsuuntumisaste
0	0–10	ei harsuuntunut
1	11–20	lievästi harsuuntunut
2	21–30	kohtalaisesti harsuuntunut
3	31–40	– " –
4	41–50	– " –
5	51–60	– " –
6	61–70	vakavasti harsuuntunut
7	71–80	– " –
8	81–90	– " –
9	91–100	– " –



Kuva 48. Kuusen harsuuntuneisuus arvioidaan elävän latvuksen ylemmästä puoliskosta, männyn ja lehtipuiden harsuuntuneisuus elävän latvuksen ylimmästä 2/3-osasta. Piirros: Ilkka Taponen.

Harsuuntuneisuuden arviointi on ongelmallista

Harsuuntuneisuuden soveltuvuutta puiden kunnon mittariksi on arvosteltu ajoittain erittäin voimakkaasti. Ennen kaikkea on arvosteltu harsuuntuneisuuden arvioinnin subjektiivisuutta ja saatujen tulosten tulkinnanvaraisuutta. On vaikeaa erottaa puiden iän ja kasvupaikan tai säiden vaikutusta esimerkiksi ilmansaasteiden vaikutuksista. Lisäksi neulasten ja lehtien määrä vaihtelee puissa perinnöllisestikin, eikä terveen vertailupuun määrittäminen ole aina helppoa.

Harsuuntuneisuuden arviointi on toistaiseksi ollut ainoa käytettävissä oleva menetelmä, jolla on voitu vuosittain arvioida metsien elinvoimaisuutta valtakunnallisesti. Kuitenkin silmävaraista arviointia tarkempia neulasmassan mittausmenetelmiä tarvitaan. Arvioinnin luotettavuutta pyritään jatkossa parantamaan mm. yhdistämällä kaukokartoitusmenetelmillä saatavaa tietoa silmävaraisiin maastohavaintoihin.

Harsuuntuneisuuden ja puiden monien muiden kuntotunnusten on havaittu vaihtelevan samansuuntaisesti. Harsuuntuneisuus onkin osoittautunut käyttökelpoiseksi yleisen elinvoimaisuuden osoittajaksi; sen avulla puiden elintoimintoihin keskeisesti vaikuttavan usean tunnuksen informaatio saadaan tiivistettyä yhteen lukuarvoon.

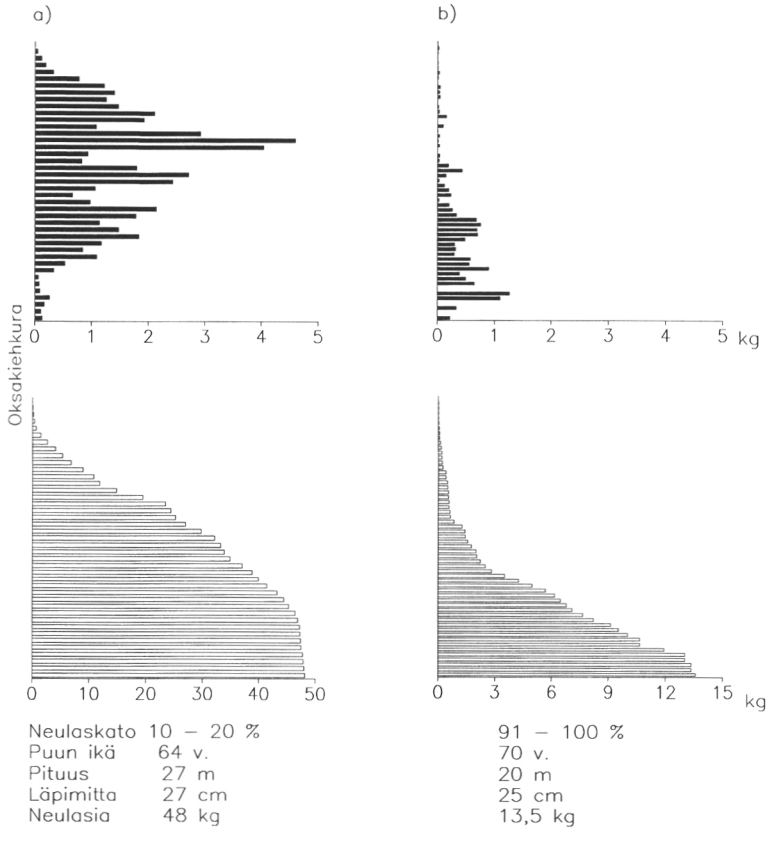
Kuinka paljon puussa on neulasia?

Lehtimassan on todettu riippuvan puun kokosuhteista. Esimerkiksi havupuilla neulasmassaa on sitä enemmän, mitä suurempi on rungon mantopuun pinta-ala. Tämä johtuu neulasten ja mantopuun toiminnallisesta yhteydestä, sillä neulasten tarvitsema vesi kulkee mantopuun putkisoluissa.

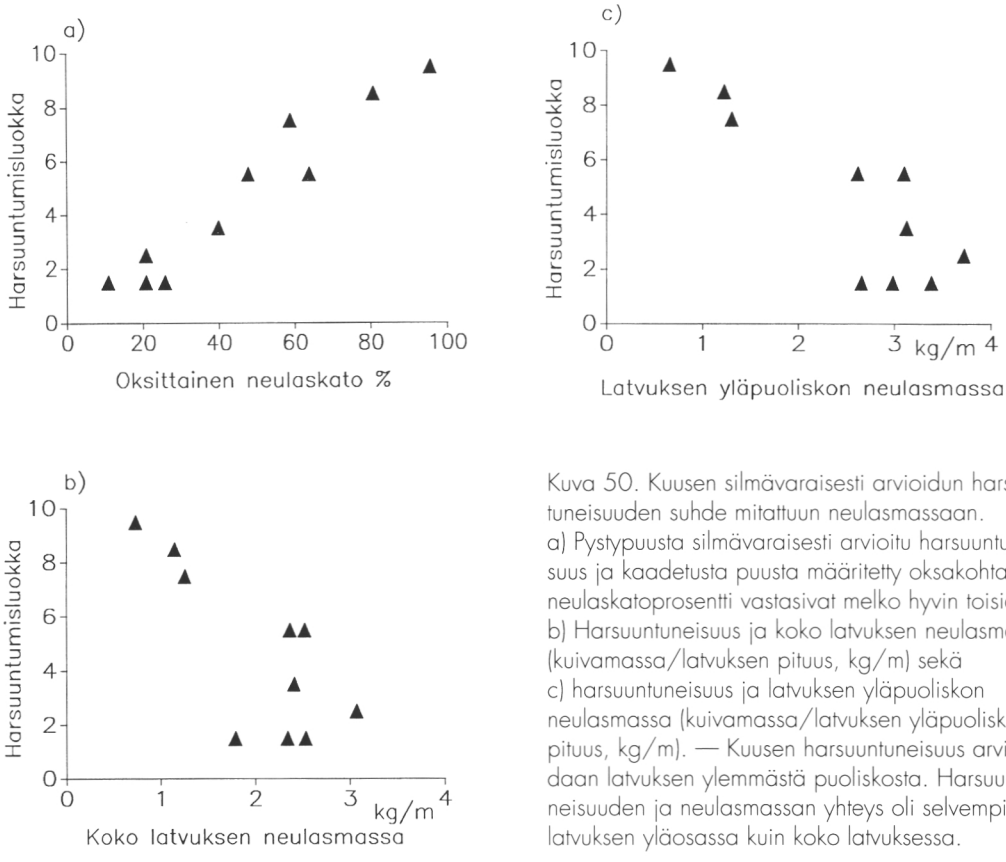
Neulasten määrä riippui selvästi puun koosta ja harsuuntuneisuudesta (kuva 49). Harsuuntumattomassa puussa suurin osa neulasmassasta oli latvuksen yläpuoliskossa, vakavasti harsuuntuneessa puussa taas latvuksen alapuoliskossa.

Neulasmassalla oli selvä yhteys myös mantopuun 1,3 metrin korkeudelta mitatun poikkileikkauksen pinta-alaan. Puun pituus, latvussuhde, viiden edellisen vuoden paksuuskasvu, rinnankorkeusläpimitta ja lähimmän naapuripuun etäisyys selittivät yhdessä neulasmassan vaihtelun lähes kokonaan.

Silmävaraista harsuuntuneisuusarviota tarkennettiin tutkimalla kaadettuja koepuita näyteoksittain. Latvusten neulasmassat määritettiin näyteoksien neulasten kuivamassan ja oksien määrän avulla. Puiden kokoerojen vaiku-



Kuva 49. Lievästi (a) ja vakavasti (b) harsuuntuneen, lehtomaisella kankaalla Tuusulassa kasvaneen kuusen neulasmassa (kuivamassa, kg). Yläkuvissa esitetään eri korkeuksilla olevien oksakiehkuroiden mitatut tai mallilaskelmilla arvioidut neulasmassat, alakuvissa esitetään neulasmassojen kumulatiiviset jakaumat.



Kuva 50. Kuusen silmävaraisesti arvioidun harsuuntuneisuuden suhde mitattuun neulasmassaan.
a) Pystypuusta silmävaraisesti arvioitu harsuuntuneisuus ja kaadetusta puusta määritetty oksakohtainen neulaskatoprosentti vastasivat melko hyvin toisiaan.
b) Harsuuntuneisuus ja koko latvuksen neulasmassa (kuivamassa/latvuksen pituus, kg/m) sekä
c) harsuuntuneisuus ja latvuksen yläpuoliskon neulasmassa (kuivamassa/latvuksen yläpuoliskon pituus, kg/m). — Kuusen harsuuntuneisuus arvioidaan latvuksen ylemmästä puoliskosta. Harsuuntuneisuuden ja neulasmassan yhteys oli selvempi latvuksen yläosassa kuin koko latvuksessa.

tusta pienennettiin vakioimalla neulasmassat latvuksien pituuksilla (kuva 50). Latvuksissa oli sitä vähemmän neulasia mitä suuremmaksi neulaskato oli silmävaraisesti arvioitu, ja latvuksen yläpuoliskolle näyteoksien perusteella laskettu oksakohtainen harsuuntuneisuusprosentti vastasi suhteellisen hyvin pystypuusta arvioitua harsuuntuneisuusluokkaa.

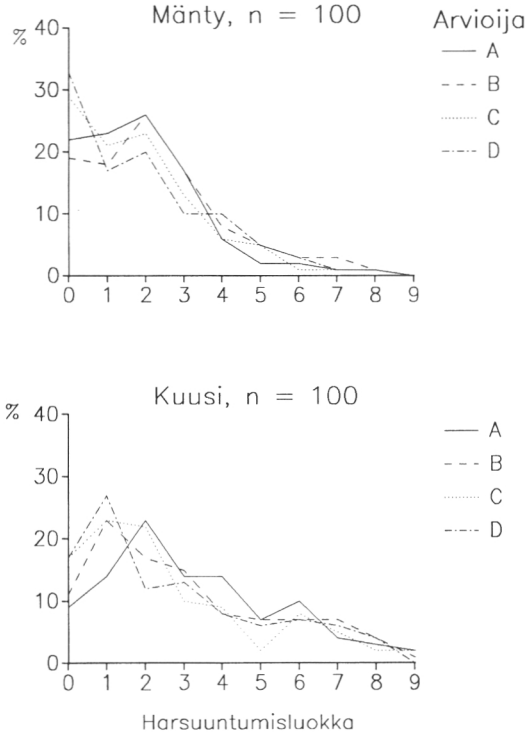
Silmävaraisen harsuuntuneisuusarvion luotettavuus

Latvusten kunnon silmävarainen arviointi on aina subjektiivista ja arviointitulokseen voivat vaikuttaa monet esimerkiksi metsikön tiheydestä, sääoloista ja valaistuksesta johtuvat virhelähteet. Esimerkiksi vastavalossa harsuuntuneisuus usein yliarvioidaan. Neulasten väriviat taas näkyvät parhaiten myötävalossa. Arvioijien koulutus ja "silmien kalibrointi" onkin välttämätöntä ennen kartoituksen aloittamista.

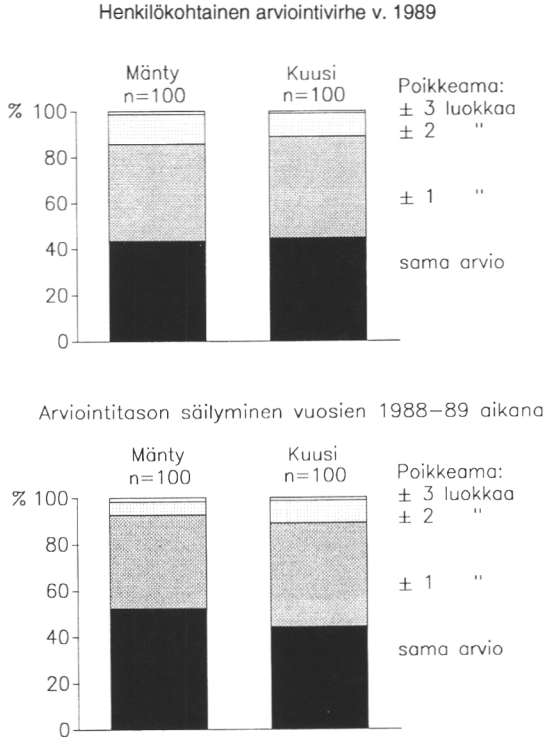
Valtakunnallisen harsuuntuneisuusarvioinnin vuosina 1986–90 tehneiden neljän arvioijan määrityksien yhden-

mukaisuutta ja henkilökohtaisen arviointitason säilymistä on tutkittu maastotesteillä (ks. *Metsien elinvoimaisuuden vuosittainen seuranta,* s. 105). Eri arvioijat ovat määrittäneet samojen puiden harsuuntuneisuuden toistensa arvioinneista tietämättä. Arvioijien välillä ei ollut tilastollisia eroja verrattaessa eri harsuuntuneisuusluokkiin luokiteltujen puiden osuuksia (kuva 51). Lähes 90 % yksittäisistä puista arvioitiin yhden luokan yli- tai aliarvion tarkkuudella samoin (kuva 52).

Maastotestien mukaan kokeneiden arvioijien luokitteluerot olivat niin pieniä, etteivät ne olennaisesti vähennä tulosten luotettavuutta. Arvioitaessa valtakunnallisesti tuhansia puita yli- ja aliarvioinnit lisäksi kompensoivat toisiaan. Silmävaraisessa arvioinnissa on kuitenkin aina epävarmuustekijöitä, jotka on pidettävä mielessä tulkittaessa valtakunnallisia harsuuntuneisuustuloksia.



Kuva 51. Tuusulassa tehdyssä testissä neljä arvioijaa luokitteli testiaineiston puut (100 mäntyä ja 100 kuusta). Eri harsuuntuneisuusluokkiin luokiteltujen puiden osuuksissa ei ollut tilastollisia eroja arvioijien välillä. Suurimmat erot olivat harsuuntumattomaksi (harsuuntuneisuus 0–10 %) luokiteltujen puiden osuuksissa.



Kuva 52. Arvioijat luokittelivat männyistä 44 % ja kuusista 45 % täysin samoin tarkasteltaessa yksittäisen puun arviointia. Yhden luokan yli- tai aliarvion rajoissa 86 % männyistä ja 89 % kuusista arvioitiin yhdenmukaisesti. Henkilökohtainen arviointitaso vaihteli ajan kuluessa melko vähän. Yli 90 % testipuista arvioitiin yhden luokan yli- tai aliarvion rajoissa yhdenmukaisesti kahtena peräkkäisenä vuonna.

Harsuuntuminen ja puun kasvu

Yksittäisen puun harsuuntuneisuuden ja kasvun välillä on havaittu selvä yhteys (kuva 53). Harsuuntuneisuusarvioiden perusteella on kuitenkin vaikea arvioida koko metsikön kasvua. Luonnontilaisessa, täysin terveessäkin metsässä on aina itseharvenemisen seurauksena huonokuntoisia puita. Täystiheä metsikkö kykenee käyttämään elinvoimaansa menettäviltä puilta vapautuvat kasvutekijät, kuten valo ja ravinteet.

Kuolevien puiden esiintyminen metsässä ei siis merkitse välttämättä sitä, että metsikön kasvu olisi heikentynyt. Eikä yksittäisten puiden elinvoimatunnusten avulla voida tehdä kovin suoraviivaisia päätelmiä metsikön kasvukunnosta. Jos valtaosa metsikön puista menettää elinvoimaisuuttaan, luonnollisesti myös koko metsikön tuotos vähenee. Kasvutappioiden täsmällinen arviointi edellyttää kuitenkin tarkempia tutkimusmenetelmiä.

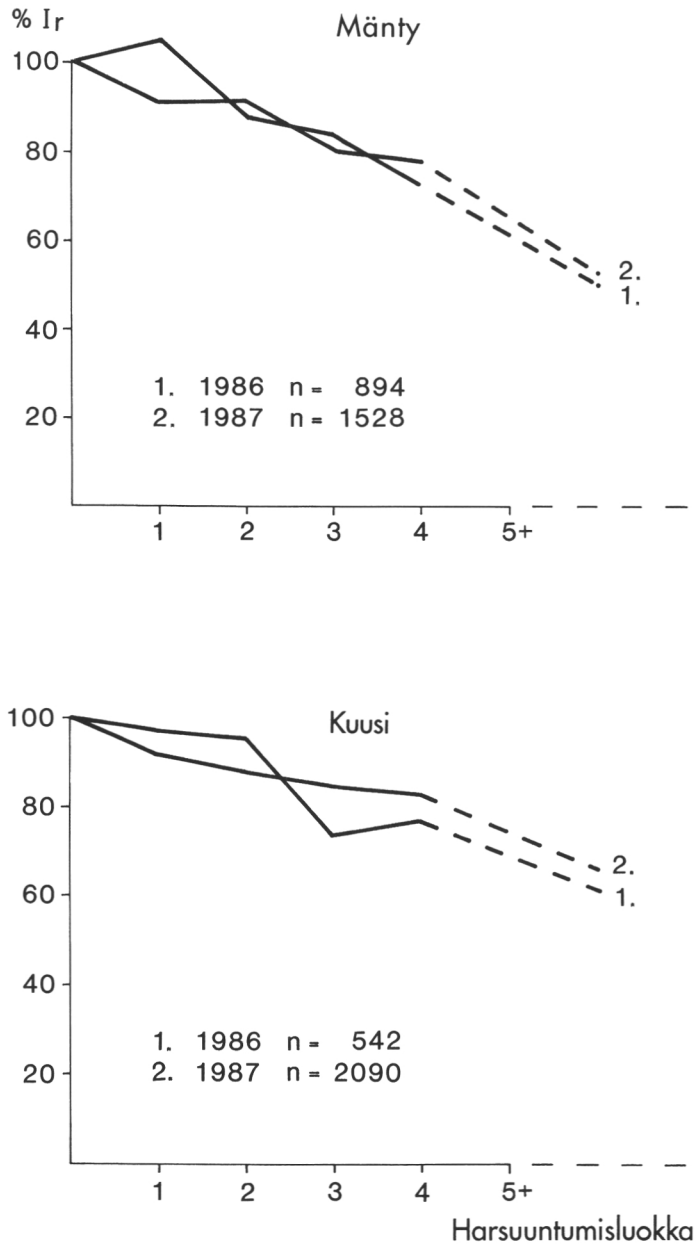
Neulasten värioireet

Kaasumaiset ilmansaasteet voivat vaurioittaa neulasia tunkeutumalla ilmarakojen kautta tai neulasten pintaa peittävän kutikulan läpi solukoihin. Syntyneiden soluvaurioiden seurauksena neulasissa ilmenee erilaisia värioireita. Neulasten väri saattaa muuttua tasaisesti tai niihin muodostuu vaaleita laikkuja tai kuolioita. Värioireita aiheuttavat myös monet luontaiset tekijät (taulukko 9). Yleensä ulkoisten oireiden perusteella ei kyetä tekemään luotettavaa diagnoosia, vaan aiheuttajan tunnistaminen edellyttää erityismenetelmien käyttöä. Mikroskooppiset havainnot neulasten sisärakenteesta kertovat myös paljon ilmansaasteiden vauriomekanismeista (ks. 4.3 *Ilmansaasteiden vaikutukset neulasten solurakenteeseen,* s. 119). Sienituhon aiheuttajien määritys taas perustuu itiöemien ja eristettyjen rihmastojen tunnistamiseen.

Rikkidioksidivaurioille on tyypillistä neulasten kärjestä alkava kellastuminen ja ruskettuminen. Tällaisia vaurioita on havaittu mm. rikkipitoista polttoainetta käyttävien teollisuuslaitosten välittömässä läheisyydessä. Alumiini-, teräs- ja lannoiteteollisuuden ympäristöissä fluoriyhdisteet ovat aiheuttaneet neulasten kärkipaloa eli neulasten kärkien ruskeaksi kuivumista. Mutta monet ravinnepuutokset (mm. magnesiumin tai kaliumin puutos) näkyvät havupuissa myös neulasten kärjen kellastumisena.

Kaasutettaessa havupuiden taimia otsonilla (O_3) neulasiin on muodostunut kellanvalkoisia pisteitä ja laikkuja. Havaitut vauriot ovat ilmenneet yleensä ensin valon puoleisissa neulasissa. Luonnossa myös monet hyönteiset ja sienitaudit samoin kuin halla, kova pakkanen tai muut äärevät sääolot aiheuttavat samannäköisiä värivikoja neulasiin.

Otsonin aiheuttamia neulasvaurioita on todettu Pohjois-Amerikassa mm. ponderosamännyllä, ja otsonin otak-



Kuva 53. Puun sädekasvun riippuvuus harsuuntuneisuudesta laskettuna VMI8:n Etelä-Suomen aineistosta vuonna 1986 ja 1987 (ks. liite 1). Sädekasvua on kuvattu kasvuindeksillä (% I_r); ks. tarkemmin s. 37. Harsuuntumisluokat, ks. s. 83.

sutaan olevan myös Keski-Euroopan havupuiden kellastumisoireiden yhtenä aiheuttajana. Suomessakin otsonipitoisuudet nousevat aurinkoisina päivinä niin suuriksi, että suorien vaurioiden syntyminen herkimmissä lajeissa on mahdollista.

Vuotuisen havupuiden elinvoimaisuuden seurannan yhteydessä on tutkittu myös värioireiden ilmenemistä ja yleisyyttä. Luvussa *Metsien elinvoimaisuuden vuosittainen seuranta*, s. 105, esitetään tuloksia neulasten keltakärkisyydestä ja oksan yläpinnan neulasten värivioista. Kuvissa 54 ja 55 on kellastumis- ja ruskettumisoireista kärsiviä kuusen oksia.

Taulukko 9. Kuusen ja männyn neulasten värioireille on monia syitä. Värimuutoksen alkamiskohta neulasella samoin kuin oireellisten neulasten ikä ja sijainti latvuksessa antavat vihjeitä aiheuttajista. K = keltainen tai kellanvihreä, R = ruskea, punaruskea tai harmaanruskea.

Aiheuttaja	Neulasen värioire			
	Tasainen	Laikkuinen	Kärjestä alkava	Tyveltä alkava
Punkit ja hyönteiset:				
Havupunkki	K	K		
Neulaspunkki	K			
Kirvat		K		
Havukirvat	K			
Sienet:				
Neulasruosteet	K,R	K,R		
Neulaskaristeet	K,R	K,R		
Lumihomeet	R			
Versosurma	R			K
Ravinnehäiriöt:				
Typen puute	K			
Fosforin puute	K,R			
Kaliumin puute			K	
Magnesiumin puute			K	
Ilmansaasteet:				
Rikkidioksidi		R	R	
Otsoni		K		
Fluoridit			R	
Muita aiheuttajia:				
Pakkanen, halla, jääpolte	R	R	R	
Kuivuus	K			
Tiesuola	R			
Vesakontorjunta-aineet	R	R		
Valaistusolojen äkillinen muutos	K			

Aiheesta enemmän

Huttunen, S. 1988. Pelastakaa metsät. 149 s. Tammi.

Jukola-Sulonen, E-L., Mikkola, K. & Salemaa, M. 1990. The vitality of conifers in Finland, 1986–88. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 511–549.

Metsänterveysopas 1988. Metsätuhot ja niiden torjunta. 168 s. Samerka Oy.

Nöjd, P. 1990. Detecting forest growth responses to environmental changes — a review of Finnish studies. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 507–522.





Kuva 54. Neulasten värioireita on seurattu vuotuisen kartoituksen yhteydessä isojen kuusien alaoksilta ja nuorien puiden koko latvuksista. Paikoitellen koko Suomesta on havaittu kuusen oksien yläpinnan neulasen värin haalistumista. Tarkasteltaessa tällaisia oksia lähemmin voidaan todeta neulasten olevan oksan yläpuolella keltakärkisiä ja keltalaikkuisia. Kuvat on otettu Tuusulan Ruotsinkylästä. Valokuvat: Erkki Oksanen.



Kuva 55. Oksien yläpinnan neulasten on todettu myös ruskistuneen aivan nuorimpia neulasia lukuunottamatta. Kuvassa oikealla oksan yläpuoli ja vasemmalla saman oksan alapuoli. Tällaista oiretta on tavattu erityisesti teiden varsilla ja reunametsissä. Kuva on Mäntsälästä. Valokuva: Erkki Oksanen.

Salemaa, M., Jukola-Sulonen, E-L. & Lappalainen, T. 1987. Vaihtovirtavastuksen käyttökelpoisuudsta kuusen (Picea abies) vitaliteettitunnuksena. Aquilo. Ser.Bot. Tom. 25 vol II: 161–166.

Westman, L. & Lesinski, J. 1986. Kronutglesning och andra förändringar i grankronan. Morfologisk beskrivning. Naturvårdsverket Rapport 3262. 96 s.

Neulasten kemiallinen koostumus elinvoimatunnuksena

Kasveista tehtävien ravinneanalyysien avulla voidaan arvioida ravinteiden puutos- ja myrkytystiloja sekä tarkkailla kasvien ravinnetilaa hyvän sadon ja laadun saavuttamiseksi. Neulasten avulla voidaan tutkia myös ilmansaasteiden vaikutuksia ja levinneisyyttä, kertoohan neulasten kemiallinen koostumus sekä maaperän ravinnetilan muutoksista että ilmansaasteiden suorista vaikutuksista puihin. Suorat vaikutukset ilmenevät mm. epäpuhtauksien kertymisenä neulasten pinnalle tai solukoihin, ja samanaikaisesti niistä voi myös huuhtoutua ravinteita. Neulasanalyysien avulla on Suomessa kartoitettu varsinkin ilman rikkiyhdisteiden leviämistä.

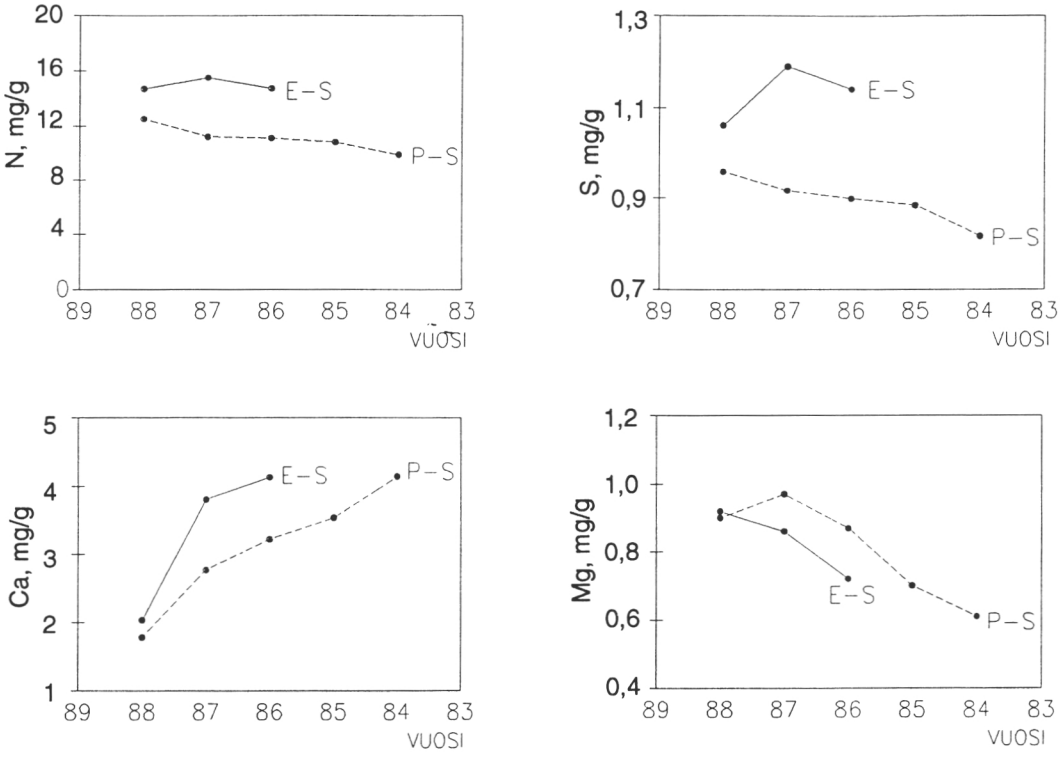
Lukuisat eri tekijät aiheuttavat luontaisesti vaihtelua neulasten kemiallisessa koostumuksessa. Näytteiden keruuta suunniteltaessa sekä tuloksia tulkittaessa onkin tärkeää tuntea näiden tekijöiden aiheuttama vaihtelu.

Neulasten ikä

Neulasten iän vaikutusta niiden kemialliseen koostumukseen tutkittiin kuivahkon kankaan 60–70-vuotiaissa männiköissä Inkoossa ja Sallassa (kuva 56). Puussa helposti tai keskinkertaisesti liikkuvien ravinteiden, kuten typen, rikin ja magnesiumin, pitoisuudet pienenivät ja heikosti liikkuvien, esimerkiksi kalsiumin, pitoisuudet kasvoivat neulasten vanhetessa. Ulkopuolista rikkikuormitusta kuvastanee se, että Inkoossa rikkipitoisuudet kohosivat neulasten vanhetessa. Ravinteiden liikkumista ks. tarkemmin *Metsikön ja puun ravinnekierto,* s. 44.

Neulasten asema latvuksessa

Männyn nuorimpien neulasten ravinnekoostumusta latvuksen eri osissa tutkittiin kuivahkon kankaan varttuneessa männikössä sekä kanervatyypin mäntytaimikossa Pohjois-Satakunnassa (kuva 57). Kummankin metsikön ravinnepitoisuudet olivat samanlaiset. Varttuneessa metsi-



Kuva 56. Männyn neulasten iän vaikutus niiden ravinnepitoisuuksiin Inkoossa (Etelä-Suomi) ja Sallassa (Pohjois-Suomi). Aineistoon sisältyi 20 mäntyä molemmilta alueilta.

kössä mäntyjen latvuksen yläosan neulasten ravinnepitoisuudet olivat korkeampia kuin latvuksen alaosan. Nuorilla männyillä korkeimmat pitoisuudet todettiin kuitenkin 3. ja 4. oksakiehkuran näytteistä.

Kuusen nuorimpien neulasten typpi-, kalsium- ja magnesiumpitoisuuksia tutkittiin 90- ja 33-vuotiaan kuusen latvuksen eri osista (kuva 58). Kuuset kasvoivat lehtomaisella kankaalla Tuusulassa. Varttuneella kuusella korkeimmat pitoisuudet havaittiin latvuksen yläosasta, missä yhteyttäminen ja muut elintoiminnot ovat voimakkaimpia. Nuorella kuusella neulasten kalsiumpitoisuudet olivat latvuksen alaosassa korkeammat kuin yläosassa. Valon jakautuminen latvuksen sisällä voi vaikuttaa havaittuihin eroihin.

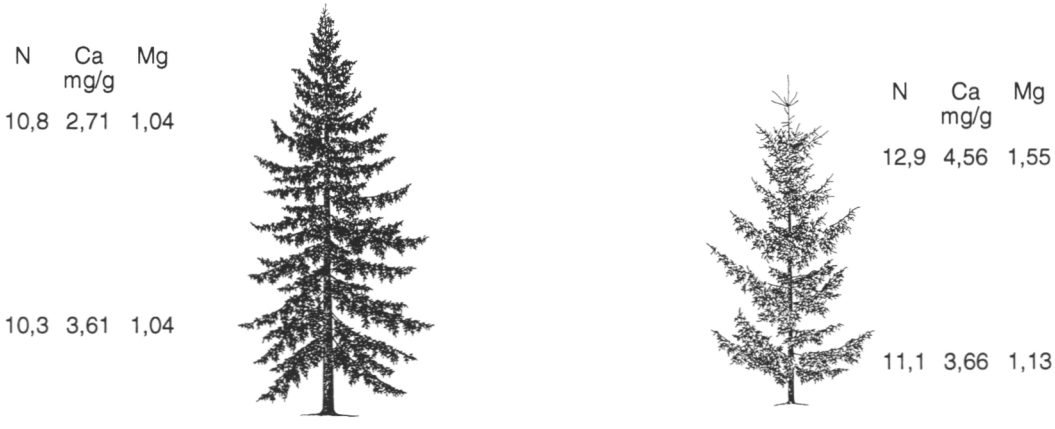
Vuodenaikainen vaihtelu

Vuodenaikojen välisiä eroja neulasten ravinnepitoisuuksissa tutkittiin lehtomaisen kankaan 70-vuotiaassa kuusikossa (kuva 59). Samoista puista kerättiin näytteet sekä maaliskuussa että marraskuussa 1987 kolmesta nuorimmasta neulasvuosikerrasta.

Kaliumin ja fosforin pitoisuudet yksivuotiaissa neulasissa olivat kevättalvella suuremmat kuin kasvukauden jälkeen. Nämä ravinteet liikkuvat helposti puun sisällä ja niitä siirtyy vanhemmista neulasista nuorempiin. Kal-



Kuva 57. Männyn neulasten typpi-, rikki-, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet latvuksen eri osissa 80- ja 25-vuotiaissa männiköissä. Aineistona oli 20 puuta molemmissa metsiköissä.



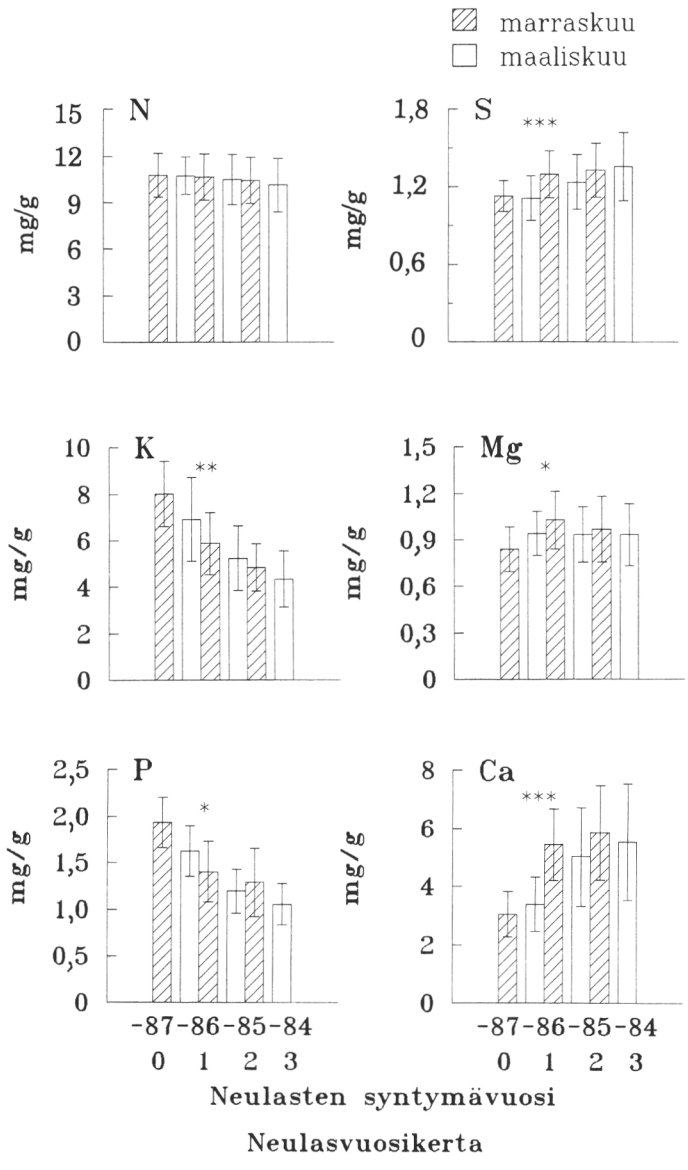
Kuva 58. Kuusen neulasten typpi-, kalsium- ja magnesiumpitoisuudet 90-vuotiaan ja 33-vuotiaan kuusen latvuksen eri osissa.

siumin, rikin ja magnesiumin pitoisuudet taas kasvoivat kesän kuluessa. Sen sijaan typpipitoisuudet olivat samantasoisia maalis- ja marraskuussa.

Aiheesta enemmän

Laaksovirta, K. 1984. Biologisten indikaattoreiden käyttö ilman saastumisen käytännön selvityksissä. Ympäristö ja terveys 2–3: 145–154.

Mälkönen, E. 1991. Neulas- ja maa-analyysien käyttökelpoisuus metsänhoitotoimenpiteiden suunnittelussa. Teoksessa: Metsänkasvatuksen perusteet turve- ja kivennäismailla. Metsäntutkimuspäivä Joensuussa 1991. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 383: 52–61.



Kuva 59. Kuusen neulasten ravinnepitoisuuksien keskiarvot keskihajontoineen. Aineistona oli 14 puuta.

Raitio H. 1991. Neulas- ja lehtianalyysi diagnostisena tutkimusmenetelmänä. Luonnon Tutkija 95: 15–18.

Salemaa, M. & Nieminen, T. 1991. Kuusen neulasten ravinnekoostumuksen vaihtelu. Luonnon Tutkija 95: 19–23.

Suomen standardisoimisliitto SFS. Standardi E204. Ilmansuojelu. Bioindikaatio. Havupuiden neulasten kokonaisrikkipitoisuus. Näytteenotto, esikäsittely ja tulosten esittäminen.

Säät vaikuttavat männyn neulasten varisemiseen

Metsäntutkimuslaitoksen Punkaharjun tutkimusalueella on vuodesta 1962 lähtien kerätty samasta männiköstä ympärivuotisesti kariketta eli puista varisevia neulasia ja muita osia.

Lämmintä kesää seuraavana syksynä varisee paljon neulasia. Tutkimusjakson aikana varisseen neulaskarikkeen määrä on vaihdellut erittäin paljon, suurimmat vuotuiset karikemäärät ovat olleet jopa kymmenkertaisia pienimpiin verrattuna (kuva 60). Yhtenäistä esimerkiksi metsikön iän mukaista vaihtelua ei ole havaittu. Heinäkuun keskilämpötilan on todettu vaihtelevan samansuuntaisesti vuotuisen karikemäärän kanssa (kuva 61), eli mitä lämpimämpää on heinäkuussa sitä enemmän neulasia varisee seuraavan syksyn aikana. Heinäkuun korkea lämpötila lisäsi myös seuraavan vuoden neulaskarikemääriä.

Myös maalis-huhtikuun keskilämpötila on yhteydessä neulasmäärän vaihteluun, mutta ei yhtä voimakkaasti kuin heinäkuun lämpötila. Mitä lämpimämpää on keväällä sitä enemmän neulasia varisee kevään kuluessa, mutta kevään lämpötila vaikuttaa vain kyseisen vuoden karikemääriin.

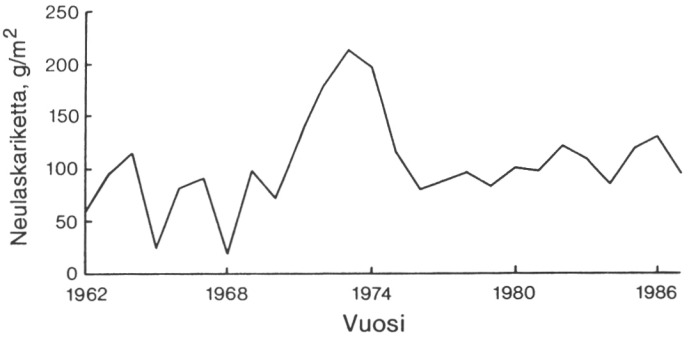
Vaikutusmekanismeja ei tunneta

Toistaiseksi ei tiedetä varmasti, miksi heinäkuun ja maalis-huhtikuun lämpötilat vaikuttavat karikemääriin. Lämpimänä heinäkuuna männyt saattavat kärsiä kuivuudesta ja pudottaa sen takia tavallista enemmän neulasiaan. Toisaalta lämmin heinäkuu saattaa merkitä myös suotuisia kasvuoloja, joiden ansiosta neulaset uudistuvat voimakkaasti.

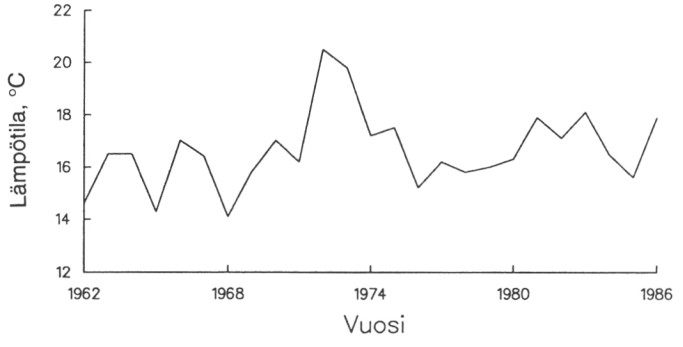
Lämmin alkukevät rasittaa mitä ilmeisimmin puita. Korkea lämpötila voimistaa yhteyttämistä, mutta maassa vielä olevan roudan takia juuret eivät pysty tehokkaasti ottamaan vettä, ja tällöin neulaset kärsivät kuivuudesta.

Ympäristön muutosten seurannan kannalta Punkaharjun pitkäaikainen neulaskarikkeen keräyssarja on kuitenkin mielenkiintoinen. Se osoittaa neulasten varisemisen vaihtelevan suuresti vuosittain, joten yhden tai vain muutaman vuoden tietoihin perustuvat johtopäätökset ovat epävarmoja. Ympäristön seurantatutkimuksissa tarvitaankin tällaisia pitkiä havaintosarjoja, jotka osoittavat luonnonmukaisen vaihtelun, johon verraten voidaan luotettavammin arvioida ihmisen aiheuttamien ulkoisten ympäristötekijöiden, kuten ilmansaasteiden vaikutuksia.

Kuva 60. Seurantajakson aikana neulaskariketta varisi vähimmillään 18 g/m² vuodessa, enimmillään 213 g/m² vuodessa. Yksi tarkasteluvuosi on jakso heinäkuusta kesäkuuhun, siis esim. 1970 vastaa jaksoa 1.7.1969–30.6.1970.



Kuva 61. Heinäkuun keskilämpötila vaihteli samansuuntaisesti karikemäärän kanssa.



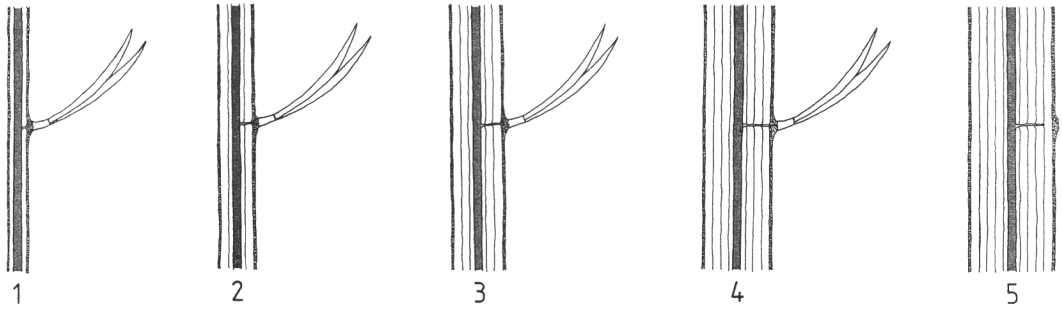
Aiheesta enemmän

Jukola-Sulonen, E-L., Mikkola, K. & Salemaa, M. 1990. The vitality of conifers in Finland 1986–88. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 511–549.

Kouki, J. & Hokkanen, T. 1992. Long-term needle litterfall of a Scots pine Pinus sylvestris stand: relation to temperature factors. Oecologia 89: 176–181.

Johtojännemenetelmällä saadaan tietoa neulasvuosikerroista puun koko elinajalta

Tietyn metsän tai puun aiempaa kehitystä on mahdollista selvittää monella tavalla. Puiden vuotuisen paksuuskasvun vaihtelua voidaan tutkia mittaamalla vuosirenkaiden eli vuosilustojen paksuudet. Näillä ns. dendrokronologisilla kasvunvaihtelututkimuksilla on Yhdysvalloissa selvitetty ilmastonmuutoksia lähes 4000 vuoden ajalta, ja Suomessakin männyn paksuuskasvun vaihtelun avulla on tutkittu ilmaston muutoksia aina 1100-luvulle asti.



Kuva 62. Kaavamainen esitys männyn neulasparin (kääpiöverson), johtojänteen ja varsinaisen kasvaimen suhteista viiden kasvukauden aikana neulasparin syntymästä sen karisemisen jälkeiseen vuoteen.

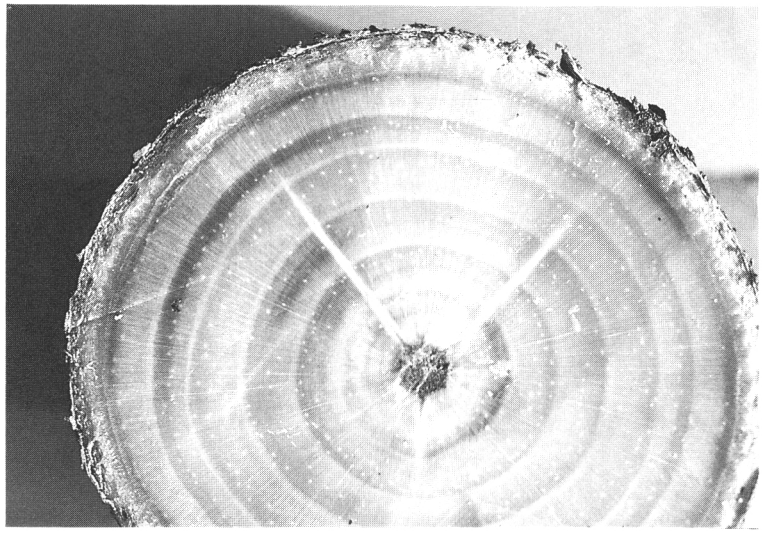
Vuosilustoista voi nähdä puun kasvun vaihtelevan vuosittain ja ajanjaksoittain. Kahden peräkkäisen kymmenvuotisjakson keskimääräisen kasvun ero voi olla jopa yli 20 %. Suurelta osin tämä johtuu säiden vaihteluista, jotka tunnetaan ns. nälkä- ja katovuosien osalta jo varhaisilta ajoilta, mutta josta luotettavimmat tiedot on saatu vasta ilmastoasemien perustamisen jälkeen. Esimerkiksi ns. lämpökauden, eli vuosien 1930–40 kesien jakson keskilämpötila oli 2,7°C korkeampi kuin vuosien 1900–10 jaksolla.

Paksuuskasvun vaihtelu ei kuitenkaan kerro suoraan puiden vihreän latvuksen muutoksista. Miltä puut näyttivät vuosisadan alkukymmeninä, kun ne kasvoivat huonosti? Olivatko puut harsuja vai normaalin tuuheita? Voiko kasvu vaihdella luonnonoloissa myös ilman neulasmäärän vaihtelua? Puiden harsuuntuneisuutta on arvioitu vasta vuodesta 1985 lähtien (ks. *Harsuuntuneisuus valtakunnan metsien inventoinnin mukaan,* s. 102), joten menneisyydestä on vain vähän tietoa käytettävissä.

Selvitettäessä neulasia karistavien sienitautien merkitystä puiden kehitykselle alettiin vuonna 1987 kehitellä menetelmää, jonka avulla voitaisiin luotettavasti tutkia neulasten karisemisen vaihtelua menneisyydessä. Menetelmästä on käytetty nimeä johtojännemenetelmä. Uuden menetelmän avulla voidaan selvittää puussa olleiden neulasvuosikertojen määrä koko puun elinajalta sekä neulasten ikä.

Johtojänteen pituus kertoo neulasen iän

Männyn kääpiöverso, johon kiinnittyy neulaspari, ja runko ovat yhteydessä toisiinsa johtojänteen avulla, jonka kautta vesi ja ravinteet kulkevat rungosta neulasiin. Johtojänne alkaa rungon (verson) ytimestä ja ulottuu sen pintaan (kuoreen) saakka niin kauan kuin kääpiöverso on puussa. Kun neulaspari irtoaa, johtojänteen kasvu lakkaa, vaikka vuosilustoja tulee lisää (kuva 62). Johtojänteen ulompi pää, jossa neulaset olivat kiinni, jää siten vuosi vuodelta yhä syvemmälle rungon pinnasta.



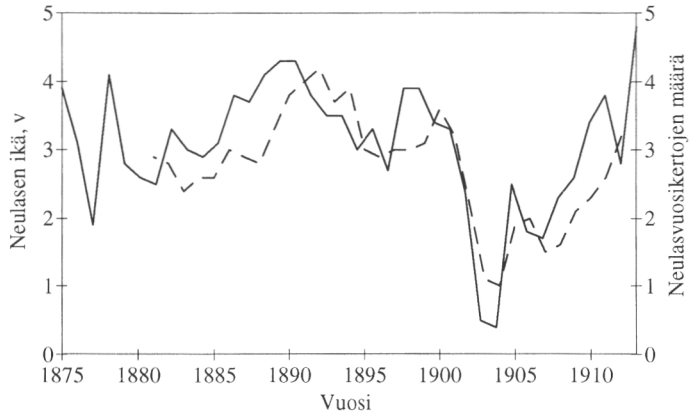
Kuva 63. Männyn poikkileikkauksessa kääpiöversojen muodostamat jäljet näkyvät selvinä. Kuvan vuorimännyssä on näkyvissä kolme kääpiöversoa. Valokuva: Timo Kurkela.

Johtojänteen pituus, eli kuinka moneen vuosilustoon johtojänne ulottuu, kertoo suoraan, kuinka monta vuotta kääpiöverso oli puussa kiinni, eli mikä oli neulasten elinikä (kuva 63). Tietyn vuoden vuosilustosta voidaan puolestaan määrittää, kuinka monta neulasvuosikertaa puussa kulloinkin oli. Johtojännemenetelmän avulla puusta saadaan selville koko sen elinajalta mm. neulasvuosikertojen määrä kunakin vuonna kesällä ja talvella, neulasten keskimääräinen ikä kunakin vuonna, vuotuinen neulasten kariseminen sekä puun neulasmäärän ajallinen vaihtelu. Tulokset voidaan myös kytkeä esimerkiksi kasvukauden lämpötilaan tai puun kasvutietoihin. Analysoimalla riittävästi puita tiedot voidaan yleistää metsikkötasolle.

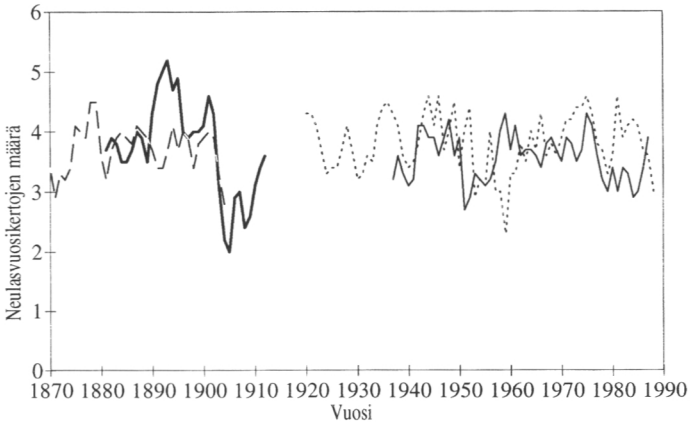
Johtojännemenetelmässä on tutkittava vuosilusto kerrallaan. Yhdestä puusta joudutaan käymään läpi jopa 10 vuosilustoa, sillä neulaset saattavat säilyä puussa jopa 10 vuotta. Siten puun historiaan paneutuminen on varsin hidasta.

Harsuuntuneita puita on ollut ennenkin

Neulasvuosikertojen vaihtelua aina 1860-luvulta nykyhetkeen selvitettiin noin 40 Etelä- ja Pohjois-Suomessa kasvavan männyn avulla. Tulosten mukaan Lapissa näyttää olleen 1900-luvun alussa suuri neulaskato (kuva 64), joka on ulottunut koko Fennoskandiaan. Rovaniemen maalaiskunnan Hietaperänkankaan puut ovat kokeneen vuonna 1902–03 huomattavasti ankaramman neulaskadon kuin kesällä 1987, jolloin sattui ns. Lapin neulaskato, jossa männyn keskimääräinen neulasvuosikertojen määrä putosi yli viidestä kolmeen. Sen sijaan yksittäisten mäntyjen latvoissa vuosikertoja oli vuosina 1904–08 korkeintaan kaksi. Osittain tämä johtui vuosina 1902 ja 1903 syntyneiden neulasten lyhytikäisyydestä.



Kuva 64. Männyn neulasten keskimääräisen iän (yhtenäinen viiva) ja neulasvuosikertojen vaihtelu (katkoviiva) yhdessä puussa Hietaperänkankaalla Rovaniemellä vuosina 1875–1912.



Kuva 65. Männyn neulasvuosikertojen määrä talvella neljässä puussa Hietaperänkankaalla Rovaniemellä vuosina 1870–1988. Kukin puu piirretty omana käyränään.

Samanaikaisesti vuosisadan alun neulaskadon kanssa alkoi heikon kasvun kausi, joka kesti yli kymmenen vuotta. Koska kasvun romahduksen tiedetään johtuneen säistä, ilmastolliset tekijät ovat todennäköisesti aiheuttaneet myös ankaran neulaskadon. Sääasemien mukaan kesä 1901 oli poikkeuksellisen lämmin, kesä 1902 taas erittäin lyhyt ja kylmä. Lisäksi syksyllä 1902 esiintyi kovia pakkasia, joiden on arveltu vaurioittaneen huonoimmin talveentuneita puita.

Ainakaan tähän mennessä tutkittujen puiden perusteella ei voi sanoa, että männyn neulasvuosikerrat olisivat vähentyneet Lapissa viimeisten 120 vuoden aikana (kuva 65). Männyn latvakasvaimessa on ollut talvisin keskimäärin 2,6–2,8 neulasvuosikertaa. Tämä on vaihdellut ajoittain erittäin paljon, mutta toistaiseksi muutokset ovat olleet palautuvia. Neulasvuosikertojen määrät ovat vaihdelleet paljon myös Etelä-Suomessa. Kuitenkaan tässä pienessä tutkimusaineistossa ei yhdessäkään puussa ole ollut täyttä viittä neulasvuosikertaa viimeisten 40 vuoden kuluessa. Neulaset ovat säilyneet puussa keskimäärin 3 vuotta, vaihdellen 0,5 vuodesta 4,5 vuoteen (ks. myös *Metsien elinvoimaisuuden vuosittainen seuranta,* s. 105).

Johtojännemenetelmällä pystytään selvittämään neulashistoria lähes puun syntyhetkeen asti. Parhaita puun osia ovat ne, joissa puun ytimen läheiset vuosilustot ovat leveitä. Siksi vanhoista puista tutkitaan ensimmäiseksi vain tyviosat. Lapin mänty voi olla jopa 600 vuotta vanha, joten tutkimalla sen tyviosaa saadaan tietoa puun neulasmääristä monen vuosisadan takaa. Jos vanhoja eläviä puita ei ole käytettävissä, voidaan tutkia myös pystyssä olevia tai kaatuneita kuolleita puita sekä vanhoja rakennuspuita. Turvesoista nostettavilla puilla saatetaan päästä aineistossa vuosituhansien päähän menneisyyteen.

Johtojännemenetelmällä on alettu selvittää männyn neulasvuosikertojen vaihtelua eri puolilla Suomea. Tämän pitkäaikaisen työn tavoitteena on muodostaa ns. neulasvuosikertaindeksit kasvuindeksien tapaan. Vastaavia aikasarjoja on mahdollista tuottaa myös neulasten iästä. Menetelmällä voidaan myös selvittää tunnettujen, puuston tilaan vaikuttaneiden ilmiöiden osallisuutta ja merkitystä harsuuntumisen aiheuttajana. Johtojännemenetelmää käytetäänkin esimerkiksi Kuolan ja Harjavallan teollisuuslaitosten päästöjen vaikutusten tutkimiseen.

Aiheesta enemmän

Jalkanen, R. 1988. Karisevatko viimeisetkin neulaset Pohjois-Suomen puista? Teollisuuden metsäviesti 1/1988: 8–11.

Jalkanen, R. & Kurkela, T. 1990. Needle retention, age, shedding and budget, and growth of Scots pine between 1865 and 1988. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 691–697.

Jukola-Sulonen, E.-L., Mikkola, K. & Salemaa, M. 1990. The vitality of conifers in Finland, 1986–88. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.): Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 523–560.

Mikola, P. 1952. Havumetsien viimeaikaisesta kehityksestä metsänrajaseudulla. Summary: On the recent development of coniferous forests in the timberline region of northern Finland. Commun. Inst. For. Fenn. 40(2). 35 s.

Sirén, G. 1961. Skogsgränstallen som indikator för klimatfluktuationerna i norra Fennoskandien under historisk tid. Commun. Inst. For. Fenn. 54(2). 66 s.

4.2 Metsäpuiden elinvoimaisuus vuosina 1985–89

Metsäpuiden latvusten kuntoon perustuvan arvioinnin mukaan metsien elinvoimaisuus vaihteli tutkimusjakson 1985–89 aikana. Elinvoimaisuuden heikkenemistä osoittivat mm. harsuuntuneisuuden ja oksatuhojen lisääntyminen sekä voimakkaimmin harsuuntuneilla alueilla havaittu lievä neulasvuosikertojen määrän väheneminen. Myös neulasten värivikoja havaittiin. Harsuuntuneisuus ei kuitenkaan lisääntynyt tasaisesti koko maassa, vaan eri vuosina suurimmat muutokset osuivat eri puolille maata. Myös elinvoimaisuuden elpymistä tapahtui, sillä maan keskiosissa havupuut osoittivat merkkejä neulaskadosta toipumisesta.

Lyhytaikaisen seurannan perusteella ei vielä voida arvioida, onko harsuuntuneisuus lisääntynyt pysyvästi vai onko kyse luontaisesta vuotuisesta vaihtelusta. Männyn karikeaikasarjat ja johtojännemenetelmällä saadut tiedot neulasvuosikertojen määristä puun koko eliniältä osoittavat, että neulasten variseminen on vaihdellut suuresti jo aikaisemminkin.

Suomen metsien harsuuntuneisuus tausta-alueilla esitetään seuraavassa kolmen eri tasoisen inventoinnin perusteella (ks. myös liite 1). Valtakunnan metsien 8. inventoinnin (VMI8) yhteydessä vuosina 1985–86 perustettiin 3009 pysyvää koealaa, joilla arvioitiin havupuiden harsuuntuneisuus yhteensä 5405 puusta. Tulokset kattavat koko maan. Näistä koealoista valittiin 450 koealan otos, jolla on seurattu yhteensä 3500 puun harsuuntuneisuutta ja arvioitu muut yleiset kuntotunnukset vuosittain. Valtakunnan metsien 8. inventoinnin yhteydessä on myös kertainventoinnin koealoilta arvioitu puiden harsuuntuneisuus. Vuosina 1986–89 harsuuntuneisuus on arvioitu VMI:n yhteydessä Etelä-Suomessa yhteensä noin 20 100 puusta.

Harsuuntuneisuus valtakunnan metsien inventoinnin mukaan

Harsuuntuneisuus Etelä-Suomessa — kertakoealat

Valtakunnan metsien 8. inventoinnin kertakoealojen mittausta on tähän mennessä tehty maan eteläisimmissä metsälautakunnissa. Neljän vuoden aikana on mitattu yhteensä 25 772 metsämaan koealaa, ja yksittäisten puiden harsuuntuneisuus on arvioitu kaikkiaan 20 101 koepuusta.

Taulukko 10. Koepuiden harsuuntuneisuus VMI8:n kertainventoinnin koealoilla (metsä- ja kitumaa, kasvatusmetsien ja uudistuskypsien metsien pää- ja lisävaltapuut sekä ylispuut). Harsuuntuneiksi luokitellaan puut, joiden harsuuntuneisuusaste on yli 20 %. Vuoden 1986 tulos on: 0 Ahvenanmaan, 1 Helsingin, 2 Lounais-Suomen, 4 Uudenmaan-Hämeen (osittain) ja 8 Etelä-Karjalan metsälautakuntien alueilta. Vuoden 1987 tulos on: 3 Satakunnan, 4 Uudenmaan-Hämeen (osittain), 5 Pirkka-Hämeen ja 6 Itä-Hämeen (osittain) metsälautakuntien alueilta. Vuoden 1988 tulos on: 6 Itä-Hämeen (osittain), 7. Etelä-Savon, 9 Itä-Savon, 10 Pohjois-Karjalan (osittain) sekä 1989: 10 Pohjois-Karjalan (osittain) ja 11 Pohjois-Savon metsälautakuntien alueilta. MI-alue = metsälautakunnan alue.

	Vuosi	MI-alue	Koe-puita	Harsuuntuneisuus, %									
				0–10	11–20	21–30	31–40	41–50	51–60	61–70	71–80	81–90	>90
Mänty	1986	0,1,2,4,8	3119	90,2	5,3	2,7	1,2	0,4	0,1	0,0	–	–	–
	1987	3,4,5,6	2769	91,1	5,0	2,5	0,9	0,4	0,0	0,0	0,1	0,0	–
	1988	6,7,9,10	2949	91,0	5,4	2,5	0,8	0,3	0,0	–	–	0,0	0,0
	1989	10,11	1827	92,5	4,4	2,1	0,4	0,2	–	0,1	0,1	0,0	0,0
	(1986–1989)		10664	91,1	5,1	2,5	0,9	0,3	0,1	0,0	0,0	0,0	0,0
Kuusi	1986	0,1,2,4,8	2453	84,5	7,3	4,9	1,9	0,8	0,4	0,1	0,1	0,1	–
	1987	3,4,5,6	3241	86,3	7,0	4,3	1,4	0,6	0,2	0,1	–	0,0	0,0
	1988	6,7,9,10	2161	87,7	7,5	3,4	0,9	0,4	0,1	–	–	–	–
	1989	10,11	1582	86,9	6,8	3,6	1,6	0,4	0,2	0,1	0,2	0,1	–
	(1986–1989)		9437	86,3	7,2	4,1	1,4	0,5	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0

Taulukko 11. Koepuiden (kasvatusmetsien ja uudistuskypsien metsien pää- ja lisävaltapuut) harsuuntuneisuus 3009 pysyvällä koealalla vuosina 1985–86.

	Koepuita	Harsuuntuneisuus, %									
		0–10	11–20	21–30	31–40	42–50	51–60	61–70	71–80	81–90	>90
Mänty											
Etelä-Suomi	2621	79,0	13,2	4,5	2,1	0,8	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
Lappi	856	75,1	14,3	5,9	2,9	0,5	0,7	0,1	0,2	0,2	0,1
Koko maa	3477	78,0	13,5	4,9	2,3	0,7	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0
Kuusi											
Etelä-Suomi	1686	75,6	13,7	7,0	2,5	0,5	0,3	0,2	0,1	0,1	0,0
Lappi	242	47,3	16,7	20,8	9,5	2,3	0,8	0,8	1,1	0,4	0,3
Koko maa	1928	72,1	14,0	8,7	3,4	0,8	0,3	0,2	0,2	0,2	0,1

Kuusella harsuuntuneisuutta oli enemmän kuin männyllä. Kaikista tutkituista koepuista harsuuntuneiksi (harsuuntuneisuus yli 20 %) luokiteltiin kuusista 6,5 % ja männyistä 3,8 % (taulukko 10). Eri vuosien inventointialueiden välillä ei ollut koepuiden harsuuntuneisuudessa mainittavia eroja. Metsälautakunnittain erot olivat suurempia, esimerkiksi Helsingin metsälautakunnan alueella harsuuntuneisuutta todettiin jonkin verran enemmän kuin muualla.

Kuusivaltaiset metsät olivat harsuuntuneempia kuin mäntyvaltaiset. Lievästi harsuuntuneita metsiköitä, joissa harsuuntuneiden puiden keskimääräinen harsuuntuneisuus oli 21–40 %, oli vuosina 1986–89 inventoidulla alueella kaikkiaan noin 1 036 000 hehtaaria eli 14,0 % metsämaan pinta-alasta. Voimakkaasti harsuuntuneita metsiä, joissa oli harsuuntuneiden puiden keskimääräinen harsuuntuneisuus yli 40 %, oli noin 60 000 hehtaaria eli 0,9 % metsämaan alasta. Helsingin metsälautakunnan alueella voimakkaasti harsuuntuneiden metsien suhteellinen osuus oli yli kolminkertainen muihin alueisiin verrattuna.

Harsuuntuneisuus koko Suomessa — pysyvät koealat

Pysyvien koealojen perustamisen yhteydessä arvioitiin koko maassa vuosina 1985–86 kaikilta pysyviltä koealoilta yhteensä 5405 koepuun harsuuntuneisuus. Nämä koealat mitattiin uudelleen vuosina 1990–91.

Harsuuntuneita oli vuosina 1985–86 tutkituista männyistä 8,5 % ja kuusista 13,9 % (taulukko 11). Männyn harsuuntuneisuudessa ei Lapin ja Etelä-Suomen välillä ollut suurta eroa, sen sijaan Lapissa ja Kainuussa oli selvästi enemmän harsuuntuneita kuusia kuin muualla maas-

sa. Eteläisellä rannikkoalueella ja Kaakkois-Suomessa puut todettiin hieman harsuuntuneemmiksi kuin muualla Etelä-Suomessa. Pohjoisessa puiden voimakkaan harsuuntuneisuuden taustatekijöinä ovat metsiköiden korkea ikä sekä ilmastolliset tekijät. Metsikkökohtaisessa tarkastelussa harsuuntuneita metsiä oli metsämaan alasta suhteellisesti eniten Lapissa.

Aiheesta enemmän

Aarne, M., Uusitalo, M. & Herrala-Ylinen, H. (toim.). 1990. Metsätilastollinen vuosikirja 1989. Folia Forestalia 760. 246 s.

Metsien elinvoimaisuuden vuosittainen seuranta

Harsuuntuneisuus 1986–89

Tarkempia tutkimuksia varten pysyvistä koealoista valittiin 450 kangasmaiden koealaa, joilla on vuodesta 1986 lähtien seurattu puiden kuntoa vuosittain. Neljän vuoden ajan samat neljä arvioijaa ovat arvioineet samojen puiden kunnon (kuva 66). Seurattavina ovat olleet nuorissa ja varttuneissa kasvatusmetsissä sekä uudistuskypsissä metsissä sijaitsevien pysyvien koealojen pää- ja lisävaltapuut sekä ylispuut. Havupuiden kunto on arvioitu vuosittain heinä-syyskuussa ja lehtipuiden kunto heinä-elokuussa.

Jakson alussa seurattavia mäntyjä oli 2152, kuusia 1420 ja lehtipuita 641, eli yhteensä 4213 puuta. Jakson aikana puita kuoli ja kaadettiin, joten seurantajakson lopulla tutkittuja puita oli jäljellä enää 3521. Tulokset on laskettu näiden koko jakson aikana seurattujen puiden perusteella.

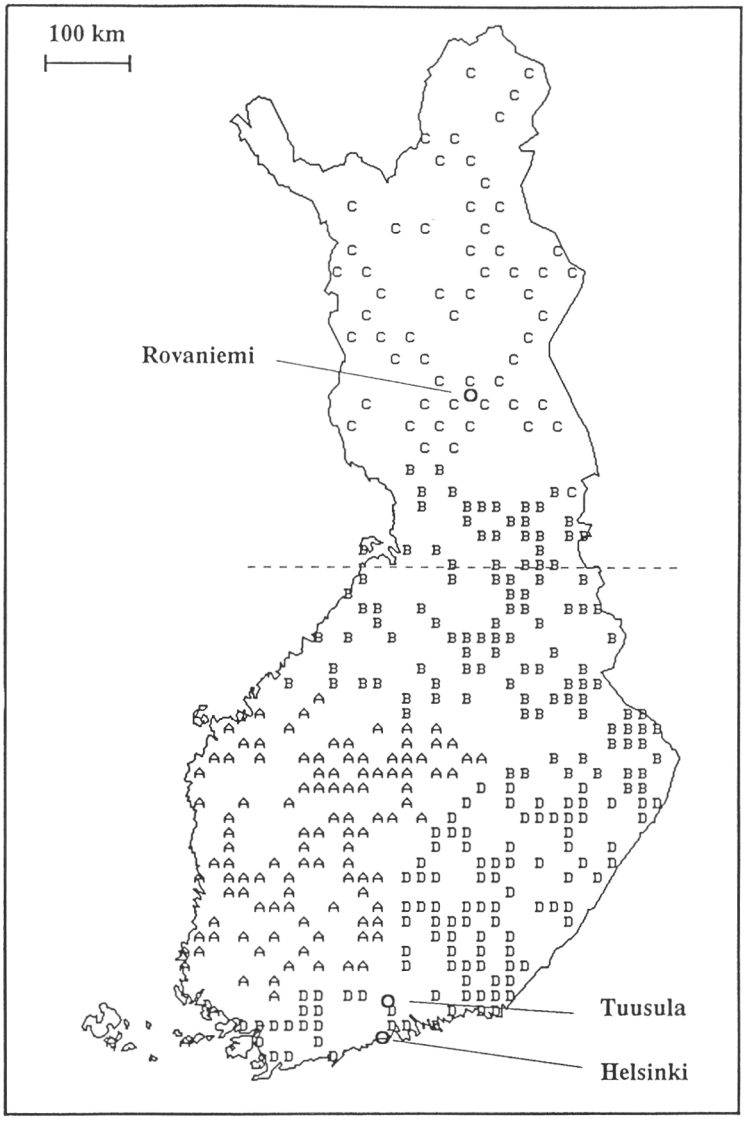
Tutkimuksessa selvitettiin Suomen metsien elinvoimaisuuden alueellista ja ajallista vaihtelua. Ilmansaasteiden osuutta havaittuihin tuhoihin ja vaurioihin tutkittiin mm. vertaamalla metsissä havaittujen vaurio-oireiden alueellisuutta ilmansaasteiden laskeumaan.

Suurin osa puista oli harsuuntuneisuudeltaan alle 20 % kaikkina seurantavuosina. Kuusikot olivat harsuuntuneempia kuin männiköt. Kaikkien puulajien harsuuntuneisuus lisääntyi nelivuotisen seurantakauden aikana 10 prosenttiyksikköä, ja kuusen harsuuntuneisuus voimistui jakson aikana enemmän kuin männyn (kuva 67).

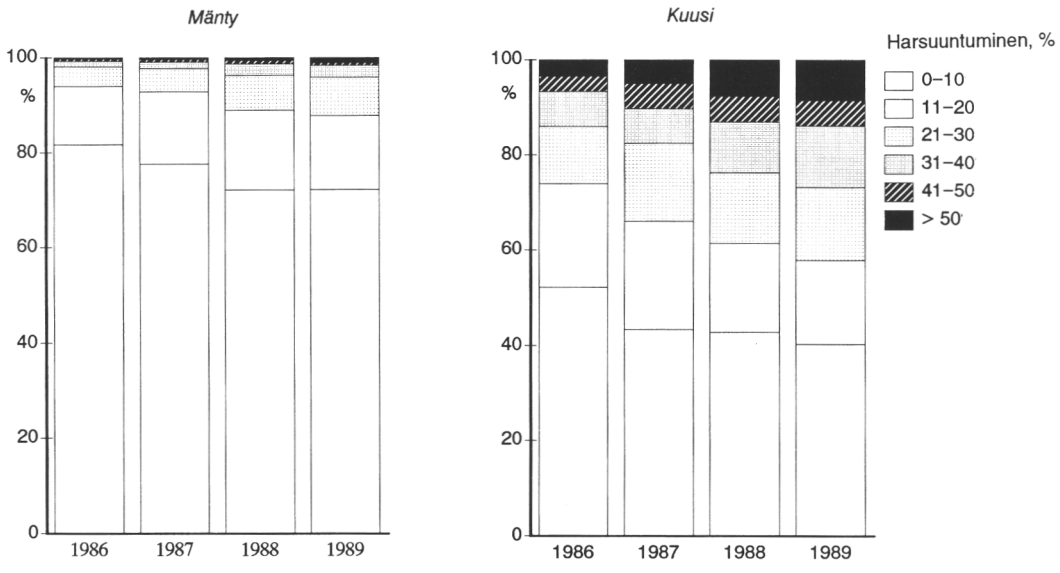
Harsuuntuneimmat metsät sijaitsivat Pohjois-Suomessa, Pohjanmaalla ja Länsi-Suomessa (kuva 68). Harsuuntuneisuus oli sitä yleisempää, mitä vanhempia metsiköt olivat (kuva 69). Harsuuntuneimmat alle 80-vuotiaat mäntymetsät kasvoivat Länsi-Suomessa. Harsuuntuneet nuo-

ret kuusimetsät sijaitsivat puolestaan Pohjanmaalla ja eteläisen Suomen teollistuneella alueella.

Harsuuntuneisuuden alueellisuus ei muuttunut merkittävästi tutkimusjakson aikana. Sen sijaan muutokset puiden kunnossa, kuten harsuuntuneisuuden lisääntyminen ja siitä toipuminen, jakautuivat eri puolille Suomea eri vuosina. Vuosien 1986 ja 1989 välillä kuusen harsuuntuneisuus lisääntyi eniten Lapissa, Pohjanmaalla ja eteläisen Suomen teollistuneilla alueilla. Männyn harsuuntuneisuus puolestaan voimistui eniten Lapissa, Länsi-Suomessa ja osassa Kaakkois-Suomea. Harsuuntuneisuus vähentyi paikoin Keski-Suomessa.



Kuva 66. Vuotuisen harsuuntuneisuuden seurannan koealat (yhteensä 450 koealaa). Neljän arvioijan inventoimat alueet on merkitty kirjaimin A–D.



Kuva 67. Männyn ja kuusen harsuuntumisjakaumat kangasmailla vuosina 1986–89. Kuvasta ilmenee, että harsuuntuminen on lisääntynyt erityisesti kuusella neljän vuoden tutkimusjakson aikana. Männyllä ei ole tapahtunut merkittävää muutosta vuosien 1988 ja 1989 välillä.

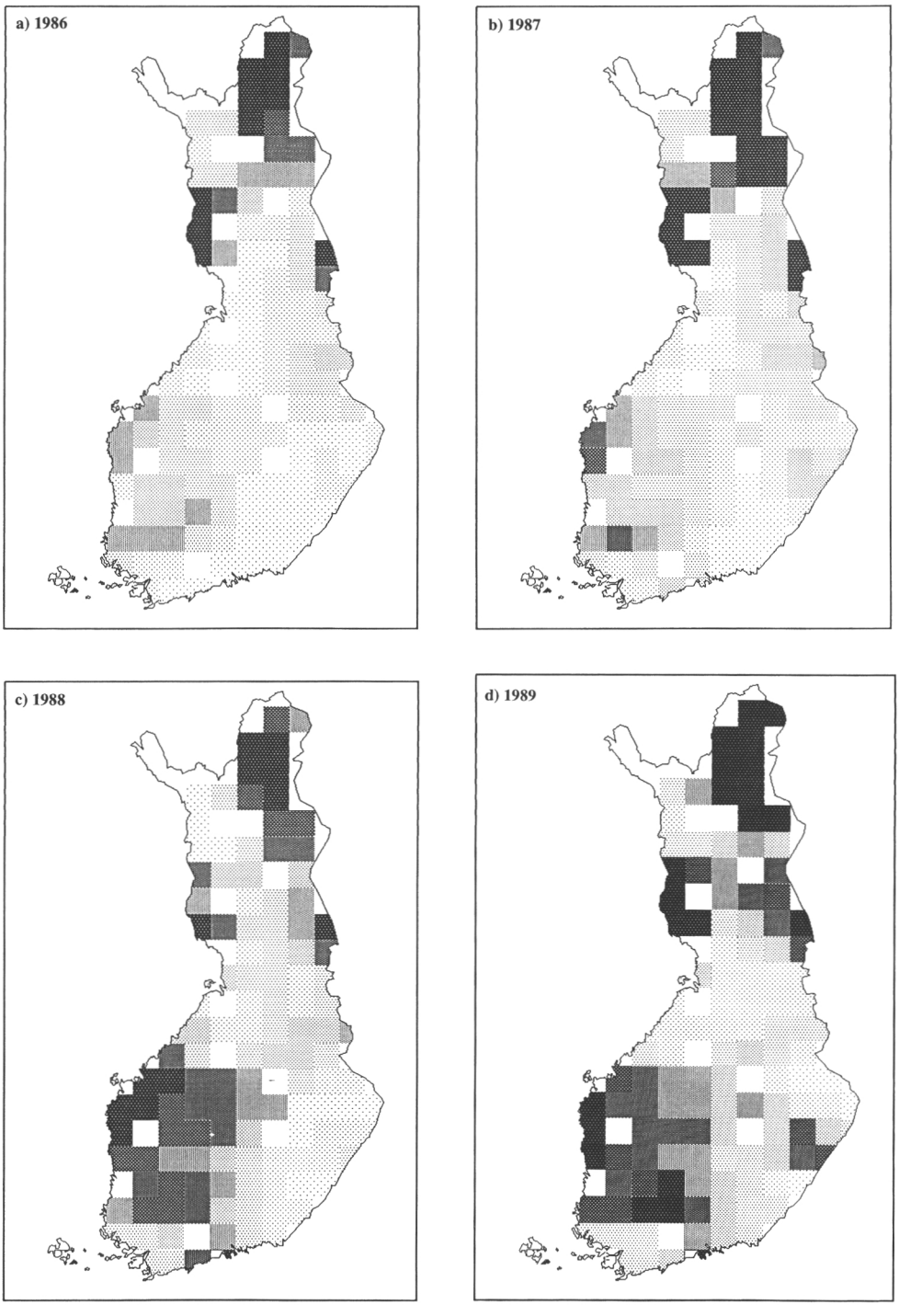
Neulasvuosikerrat 1986–89

Sekä männyllä että kuusella oli Pohjois-Suomessa enemmän neulasvuosikertoja kuin Etelä-Suomessa (kuva 70). Lapissa mäntyjen neulaset säilyivät puussa keskimäärin 4,5 vuotta ja Etelä-Suomessa 3,5 vuotta, eli Pohjois-Suomessa noin vuoden vanhemmiksi kuin Etelä-Suomessa. Lapissa vanhimmat männyn neulaset olivat jopa 7–9 -vuotiaita. Kuusen neulasten keski-ikä oli Etelä-Suomessa 7,5 vuotta ja Pohjois-Suomessa 10,5 vuotta. Lapissa kuusen neulasten ennätysikä oli 20 vuotta ja Etelä-Suomessa 13 vuotta. Voimakkaasti harsuuntuneilla puilla oli myös vähän neulasvuosikertoja.

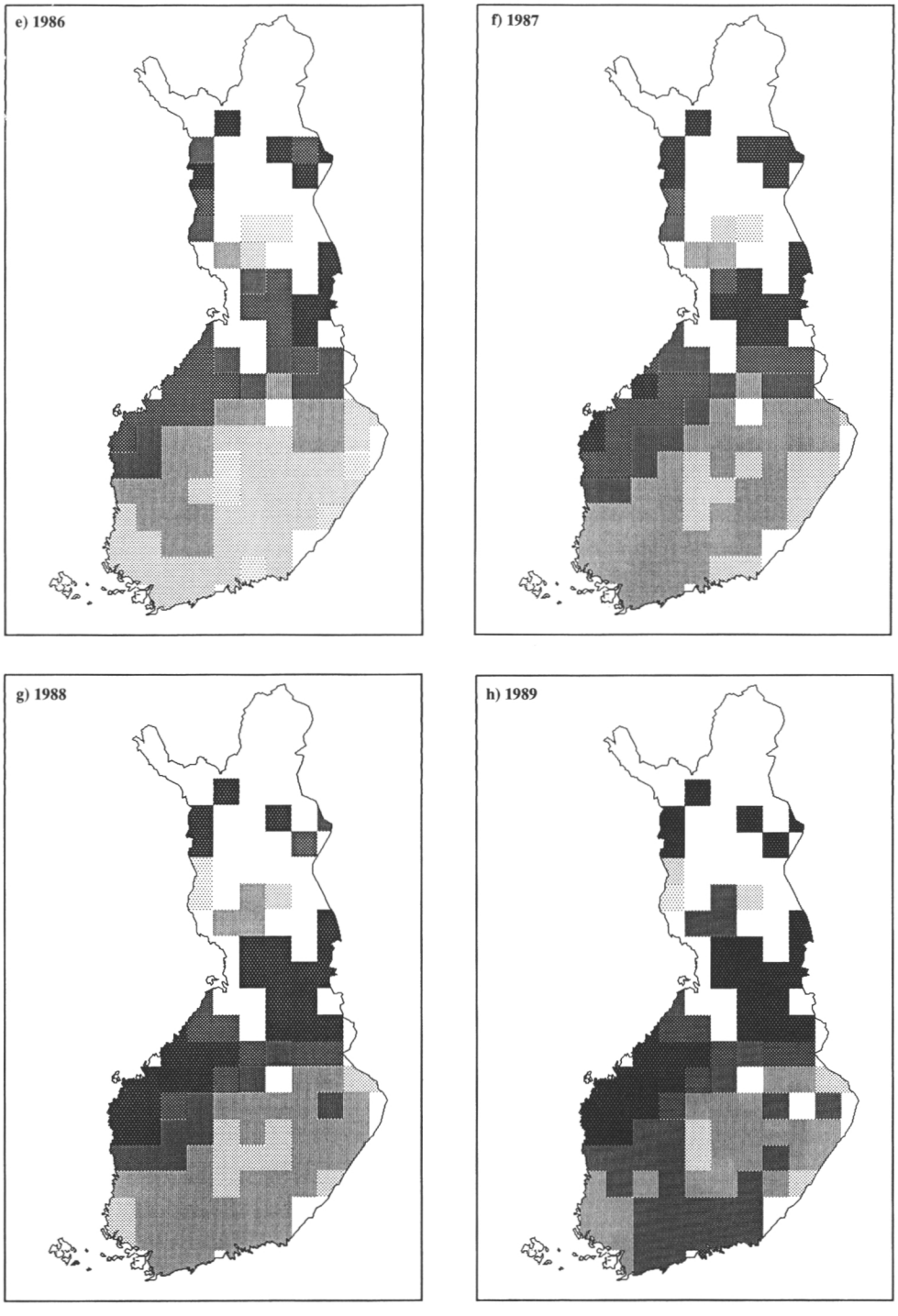
Neulasten värioireet 1989

Kuusen neulasten keltakärkisyyttä tutkittiin oksien vanhemmista osista eli yli kaksivuotiaista vuosikasvaimista. Havaittu keltakärkisyys oli hyvin lievää, vain neulasten uloin kärki oli kirkkaan tai oranssin keltainen. Voimakkaimpana oiretta tavattiin kuusella Etelä- ja Länsi-Suomessa. Lievä keltakärkisyys oli yleistä myös Kainuussa.

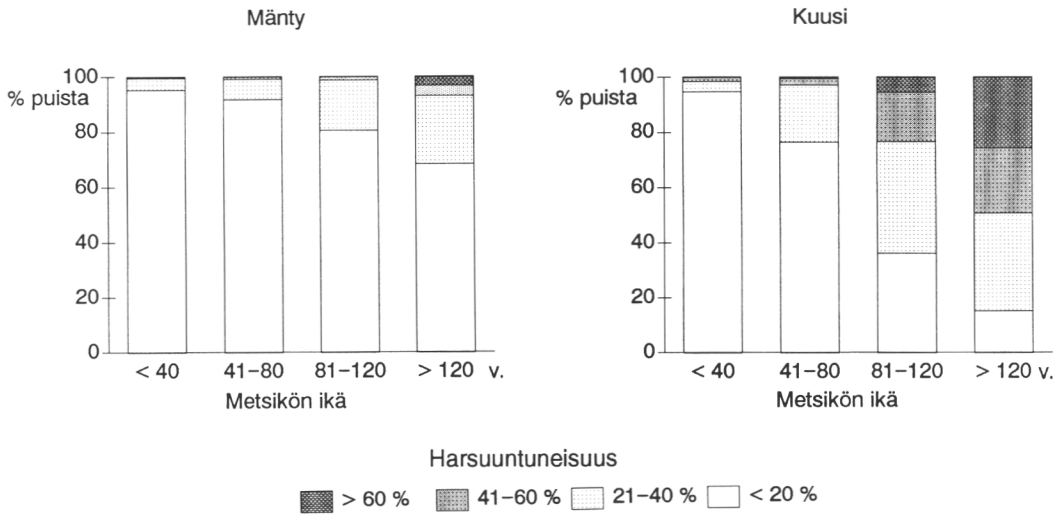
Neulasten keltakärkisyyttä todettiin neljäsosassa tutkituista kuusista, yleisimmin latvuksen yläpuoliskossa. Vain harvoin yli 10 % neulasista oli keltakärkisiä. Kansainvälisen metsävaurioiden kartoitusohjelman (UN-ECE) suositusten mukaan vasta yli 10 %:n keltakärkisyys huomioidaan lievänä värivikaisuutena. Kuusia, joissa oli keltakärkisiä neulasia, oli eniten tuoreilla kankailla (30 % oireellisista puista) ja kuivahkoilla kankailla (26 %). Oireellisten puiden määrä lisääntyi lievästi metsikön vanhe-



Kuva 68a. Harsuuntuneimmat mäntymetsät sijaitsivat Lapin koillis- ja lounaisosissa, Kuusamossa ja Etelä-Suomen länsiosissa. Männyn harsuuntuminen lisääntyi 1986–87 eniten Keski-Lapissa (ks. myös *Säät vaikuttavat männyn neulasten varisemiseen,* s. 96), 1987–88 Länsi-Suomessa ja 1988–89 Koillis-Lapissa. Maan keskiosissa mäntyjen harsuuntuneisuus pysyi muuttumattomana vuosina 1988–89 tai puut toipuivat neulaskadosta. Kartassa harsuuntuneisuus on esitetty 50 km x 50 km ruutujen neulaskatokeskiarvona. Kartoissa tummin rasteri kuvaa neulaskatoa yli 13 % ja vaalein alle 7 %. Valkeilta alueilta ei ole tietoa.



Kuva 68b. Kuuset olivat harsuuntuneimpia pohjoisimmassa Lapissa, Kainuussa ja Pohjanmaalla. Kuusen harsuuntuneisuus lisääntyi 1986–87 koko maassa, erityisesti Lapin keskiosissa. 1987–88 muutos painottui Kainuuseen ja Pohjanmaalle. Vuonna 1989 kuusten harsuuntuneisuus lisääntyi edelliseen vuoteen verrattuna eniten pohjoisella metsärajalla ja eteläisen Suomen teollistuneilla alueilla, kun taas muualla Etelä-Suomessa harsuuntuneisuus oli pysynyt ennallaan tai vähentynyt. Kartoissa tummin rasteri kuvaa neulaskatoa yli 26 % ja vaalein alle 10 %. Valkeilta alueilta ei ole tietoa.



Kuva 69. Männyn ja kuusen harsuuntuneisuus oli sitä yleisempää mitä vanhempia metsiköt olivat. Aineisto on vuodelta 1988. Mäntyjä on yhteensä 2156 ja kuusia 1440.

tessa ja harsuuntuneisuuden lisääntyessä.

Oksan ylä- ja alapinnan neulasten värieroa tutkittiin 430 männyllä ja 600 kuusella. Väriero havaittiin 36 %:ssa tutkituista männyistä ja 32 %:ssa tutkituista kuusista. Männyissä ero oli kaikissa tapauksissa lievä. Myös suurin osa kuusissa havaituista värieroista oli lieviä, oksan yläpinta oli selvästi haalistunut tai ruskettunut vain viidesosassa oireilevista puista. Lievää oksan ylä- ja alapinnan värieroa havaittiin sekä kuusissa että männyissä tasaisesti koko maassa, selvimmillään värierot olivat kuitenkin kuusissa Etelä- ja Lounais-Suomessa. Oireelliset puut eivät olleet harsuuntuneempia kuin oireettomat.

Männyissä oksan yläpinnan haalistuminen ilmeni neulasten keltakärkisyytenä. Kuusissa oire oli pääasiassa neulasten yleistä kloroottisuutta eli kellastumista, mutta myös neulasten keltakärkisyyttä, laikuttaisuutta tai tyven kellastumista havaittiin. Valossa kasvaneiden kuusen oksien yläpinnat olivat useammin kellastuneet kuin varjossa kasvaneiden.

Latvuksen rapistumisoireet 1988

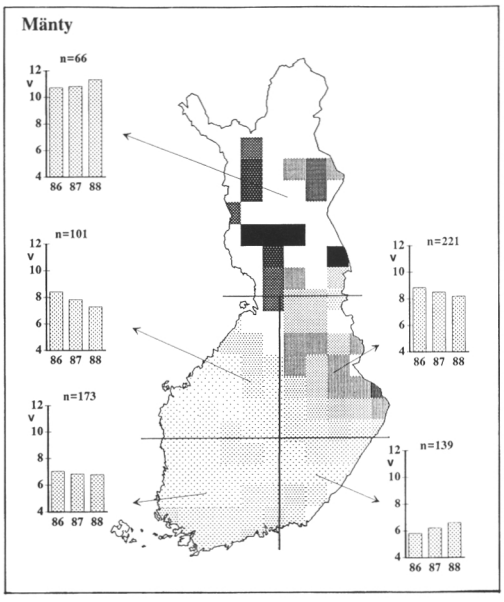
Oksatuhot kuvaavat latvuksen aukkoisuutta ja kuivien oksien määrää. Eriasteisia oksatuhoja havaittiin noin 40 %:ssa männyistä ja noin 75 %:ssa kuusista. Vuoteen 1986 verrattuna oksatuhot olivat hieman lisääntyneet ja oksien vaurioaste pahentunut. Samoissa puissa oksatuhot ja harsuuntuneisuus kytkeytyivät kiinteästi toisiinsa (kuva 71). Oksatuhojen ja harsuuntuneisuuden yhteys ei johtunut pelkästään puiden ikääntymisen aiheuttamasta rapistumisesta, sillä se havaittiin myös 60–80-vuotiaissa metsissä.

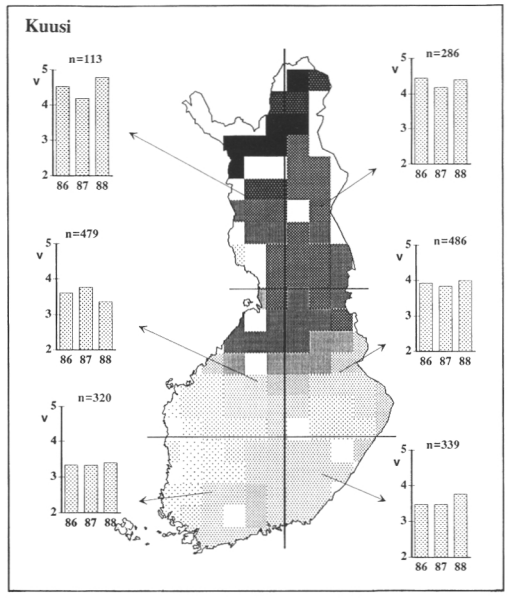
Harsuuntuneilla kuusilla havaittiin oksien yläpinnalla ns. sekundaariversoja eli hätäoksia (ks. *Latvustunnukset*

Korjaus "Metsäluonto ja Ilmansaasteet" -kirjaan

Sivu 111, kuva 70

mänty ja kuusi ovat vaihtaneet paikkaa





Kuva 70. Männyn ja kuusen neulasvuosikerrat vuosien 1986–88 keskiarvona (ruutu 50 km x 50 km). Tummilla alueilla on männyllä yli neljä, kuusella yli kahdeksan neulasvuosikertaa, vaaleammilla alueilla männyllä on alle kolme, kuusella alle kuusi neulasvuosikertaa. Valkeilta alueilta ei ole tietoa. Pylväsdiagrammeissa esitetään vuosittaiset neulasvuosikertojen muutokset eri osissa maata. Vain niillä alueilla, joilla harsuuntuneisuus lisääntyi eniten, harsuuntuneisuuden lisääntyminen näkyi myös neulasvuosikertojen vähentymisenä.

ja puun kasvu elinvoimaisuuden ilmentäjinä, s. 77). Kun puiden harsuuntuneisuus oli alle 50 %, sekundaarioksia oli selvästi vähemmän kuin ns. primaariversoja. Voimakkaasti harsuuntuneissa puissa suurin osa versoista oli sekundaarisia (kuva 72).

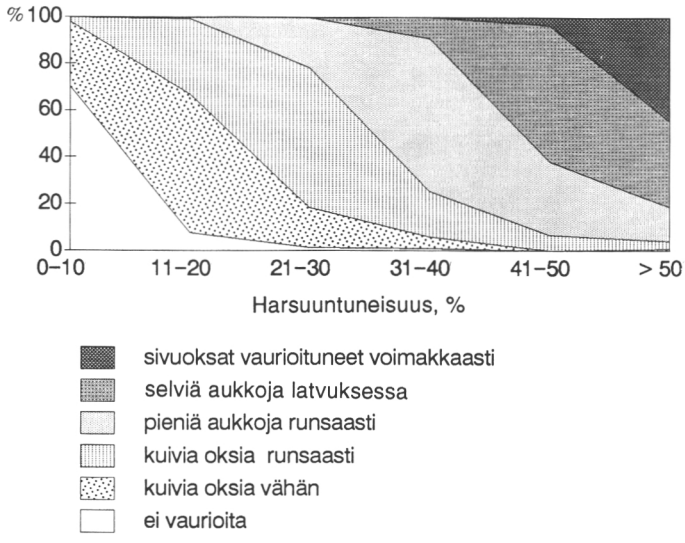
Kuusen latvan kärjen muoto muuttuu puiden harsuuntuessa. Harsuuntuneet puut olivat useammin pyöreälatvaisia kuin latvukseltaan runsasneulasiset puut (kuva 73). Välillisesti tämä kertoo puiden pituuskasvun hidastumisesta.

Noin kolmasosalla tutkituista kuusista havaittiin rungossa pihkavuotoa (kuva 74), runsasta se oli 13 %:ssa kuusista. Pihkavuotoisia puita kasvoi kaikilla kasvupaikkatyypeillä, mutta yleisintä se oli tuoreilla kangasmailla. Pihkavuotokohtia oli sitä enemmän mitä harsuuntuneempia ja vanhempia puut olivat (kuva 75).

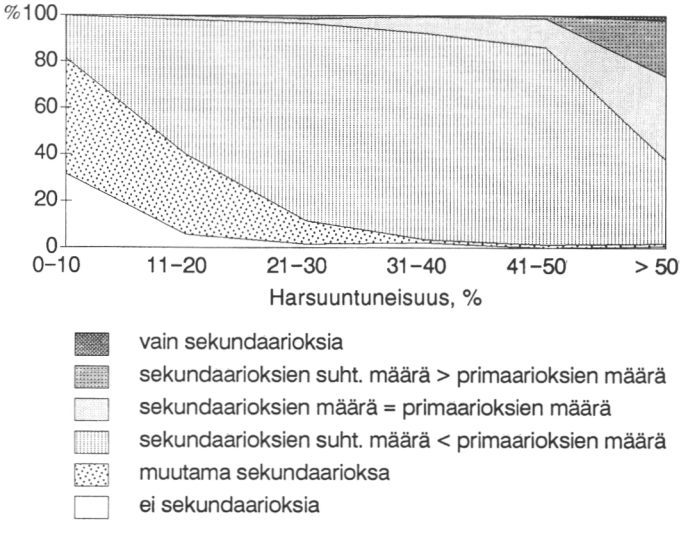
Metsien elinvoimaisuuteen vaikuttaneet tekijät

Neulaskadon syyt vaihtelivat sekä vuosittain että alueittain. Yksittäisten latvuksen kuntoon vaikuttavien tekijöiden osuutta on vaikea eritellä, sillä puiden elinvoimaisuuteen, kasvuun ja rakenteeseen vaikuttavat ympäristötekijät ovat vuorovaikutuksessa keskenään. Tietty puusta mitattu tunnus voi vaihdella jonkin ympäristötekijän muutosten mukaisesti. Erityisesti Suomessa etelä-pohjois-suuntainen vaihtelu ja vuodenaika vaikuttavat suuresti koko metsäluontoon.

Kuva 71. Harsuuntuneilla puilla oli myös runsaasti oksatuhoja. Kuviossa on yhdistetty männyn ja kuusen tulokset. Harsuuntuneisuuden ylittäessä 20 % latvuksessa oli kuivien oksien lisäksi pieniä, kuolleiden oksien katketessa syntyneitä aukkoja. Puissa, joiden harsuuntuneisuus oli 41–60 %, havaittiin latvuksessa suuria aukkoja. Harsuuntuneisuuden ylittäessä 60 % suurin osa sivuoksista oli vaurioitunut.

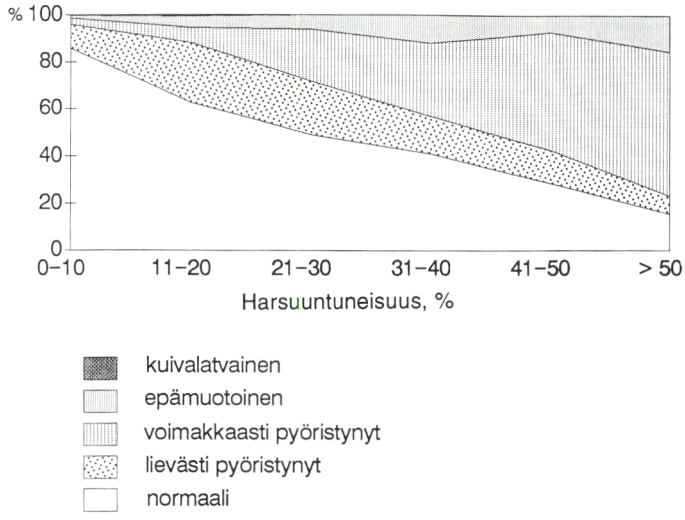


Kuva 72. Mitä harsuuntuneempia kuuset olivat, sitä enemmän niiden oksilla kasvoi sekundaariversoja eli hätäoksia.



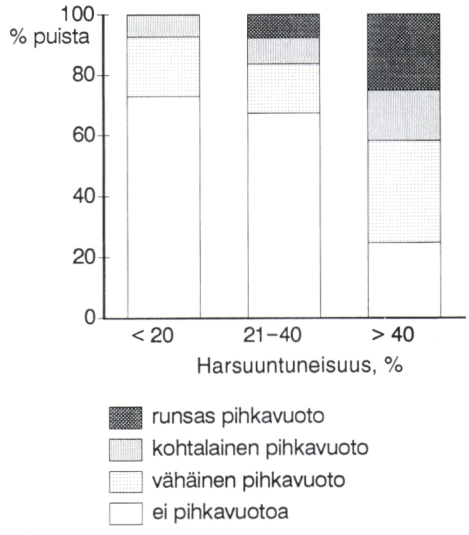
Vaihtelun aiheuttaja voi kuitenkin olla myös jokin tuntematon tekijä tai usean eri tekijän yhteisvaikutus. Näiden syy- ja seuraussuhteiden erottaminen on usein varsin vaikeaa. Metsien elinvoimaisuuteen vaikuttavien tekijöiden merkitys riippuu lisäksi maantieteellisestä sijainnista, puiden kehitysvaiheesta ja herkkyydestä sekä ympäristön saastuneisuudesta.

Kuva 73. Voimakkaasti harsuuntuneiden kuusien latvan kärjet olivat pyöristyneitä.



Kuva 74. Rungon pihkavuodon runsaus kertoo puun kunnosta. Pihkavuotokohtien lukumääriä lasketaan seurantapuista vuotuisessa seurannassa. Valokuva: Erkki Oksanen.





Kuva 75. Harsuuntuneilla kuusilla tavattiin pihkavuotoa rungossa useammin kuin harsuuntumattomilla. Kuvassa osite 60–80-vuotiaista metsistä (yhteensä 326 puuta).

Ikä ja pohjoisuus

Havumetsät olivat harsuuntuneimpia Lapin ankarassa ilmastossa. Pohjoisuus vaikuttaa samansuuntaisesti kuin metsien vanheneminen, sillä Suomessa metsien ikä kasvaa siirryttäessä etelästä pohjoiseen. Myös ruotsalaisten tutkimusten mukaan vanhat metsät tai korkeilla alueilla kasvavat metsät ovat harsuuntuneimpia.

Levinneisyysalueensa ääriosissa tai muuten ankarissa oloissa kasvavat puut ovat herkkiä pienellekin lisästressille. Esimerkiksi ilmansaasteet voivat nopeuttaa puiden normaalia, ikääntymisen aiheuttamaa rapistumista. Mutta kaikki havaittu puiden elinvoimaisuuden vaihtelu ei johdu niiden ikääntymisestä, sillä elinvoimaisuus on heikentynyt myös nuorissa metsissä Etelä-Suomen kuormitetuimmilla alueilla.

Säät ja ilmasto

Poikkeukselliset säät ovat voineet rasittaa puita kaikkialla Suomessa seurantajakson aikana. Lämmintä ja kuivaa vuoden 1986 kesää seurasi vuosisadan kylmin talvi, ja erityisesti Pohjois-Suomessa alkutalvi oli poikkeuksellisen vähäluminen. Kesä 1987 oli keskimääräistä viileämpi ja sateisempi. Sen sijaan vuosien 1988 ja 1989 alkukesät olivat lämpimiä ja kuivia talvien ollessa samalla leutoja.

Männyn neulaskato lisääntyi kesällä 1987 voimakkaasti Lapin keskiosissa. Neulaskadon syitä selvittänyt tutkimus korosti säätekijöiden ensisijaista osuutta vaurioiden syntyyn (ks. *Pohjois-Suomen neulaskato kesällä 1987,* s. 159).

Ilmansaasteet

Rikki- ja typpilaskeuma jakautuu Suomessa epätasaisesti. Se on suurin Etelä- ja Kaakkois-Suomessa, joissa on eniten saastuttavaa teollisuutta ja liikennettä, ja jonne tulee eniten kaukokulkeumaa. Koillis-Lappi on puolestaan Kuolasta tulevan rikki- ja raskasmetallilaskeuman vaikutusaluetta.

Harsuuntuneimmat metsät ja suurimmat laskeumat eivät osu samoille alueille koko Suomea tarkasteltaessa. Tutkittaessa pienempiä alueita, joissa etelä-pohjois-suuntainen vaihtelu ei ole niin määräävää, harsuuntumisen ja rikkilaskeuman väliltä on kuitenkin löydetty yhteisvaihtelua. Myös paikallisesti, esimerkiksi taajamissa ja päästölähteiden ympäristössä, ilmansaasteet voivat olla tärkeimpiä harsuuntumisen aiheuttajia.

Maaperän happamoituminen saattaa vaikuttaa puiden neulaskatoon ja neulasten värioireisiin, sillä harsuuntuneimmat nuoret metsät sijaitsivat vähäravinteisilla mailla Länsi-Suomessa. Näillä alueilla männyn harsuuntuneisuus lisääntyi eniten. Se oli kuitenkin seurausta ennen kaikkea voimakkaasta männynversosurmaepidemiasta.

Kuusen harsuuntuneisuus lisääntyi tutkimusjakson aikana eniten Kainuun vaara-alueilla ja Pohjanmaalla, jossa esiintyi myös nuoria harsuuntuneita puita. Näillä alueilla luontoa rasittavat lännestä Oulun ja Raahen päästölähteet sekä idästä Kostamuksen alueen rikkipäästöt. Vuosina 1988–89 harsuuntuneisuus lisääntyi eniten eteläisessä teollistuneessa Suomessa ja kuusen pohjoisella levinneisyysrajalla. Etelä-Suomessa kuusia vaivasivat näinä vuosina neulas- ja havupunkit sekä oksien yläpinnan ruskettuminen, jonka syytä ei ole tunnistettu.

Länsi-Suomen lisäksi männyn harsuuntuneisuus lisääntyi paikoitellen myös Etelä- ja Kaakkois-Suomessa. Keski-Lapissa harsuuntuneisuus lisääntyi joillakin alueilla, mutta toisaalla taas puut toipuivat neulaskadosta. Vuosina 1988–89 neulaskato lisääntyi Inarin Lapin vanhoissa, ennestäänkin harsuuntuneissa metsissä. Kuolan päästöjen vaikutusta Lapin metsien tilaan tutkitaan perusteellisemmin vuonna 1989 alkaneessa Itä-Lapin metsävaurioprojektissa.

Etelä-Pohjanmaa erottui selvästi sekä kuusen että männyn harsuuntuneisuuden voimistumisen takia; neulaset olivat siellä myös lyhytikäisimpiä. Pohjanmaalla on suuri osa maamme turkistarhoista. Niillä muodostuvan ammoniumtypen on havaittu aiheuttaneen paikallisesti puiden ravinnehäiriöitä (ks. tarkemmin *Typpilaskeuman vaikutukset turkistarhojen lähimetsissä,* s. 170).

Aiheesta enemmän

Jukola-Sulonen, E-L, Mikkola, K., Nevalainen, S. & Yli-Kojola, H. 1987. Havupuiden elinvoimaisuus Suomessa 1985–1986. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 256. 102 s.

Jukola-Sulonen, E-L, Mikkola, K. & Salemaa, M. 1990. The vitality of conifers in Finland 1986–88. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 523–560.

Kauppi, P., Anttila, P., Karjalainen-Balk, L., Kenttämies, K., Kämäri, J. & Savolainen, I. 1990. Happamoituminen Suomessa. HAPROn loppuraportti. Ympäristöministeriö. Sarja A 89. 89 s.

Kärenlampi, L. 1990. Maaekosysteemit vaarassa — uhkat ilmakehästä. Ekologisen ympäristöhygienian laitos. Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta. Kuopion yliopisto. Kuopion Luonnon Ystäväin Yhdistys. Kuopio. 111 s.

Metsävarat ja metsien elinvoimaisuus. 1990. Ympäristökatsaus 9. Ympäristöministeriö. 11 s.

Salemaa, M., Jukola-Sulonen, E.-L. & Lindgren, M. 1991. Forest condition in Finland, 1986–1990. Silva Fennica 25(3): 147–175.

Metsien harsuuntuneisuus Euroopassa 1989

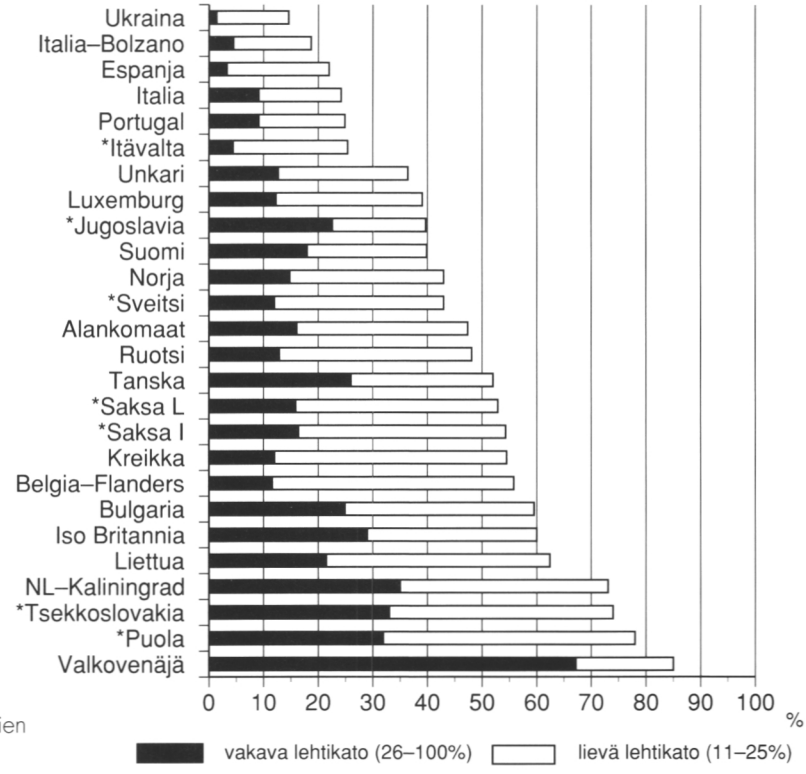
Harsuuntuneisuuden arviointi on toteutettu Euroopan eri maissa yhteisesti sovittujen menetelmien mukaan. Vuonna 1985 YK:n Euroopan talouskomission (ECE) asiantuntijat hyväksyivät harsuuntuneisuuden kansainväliseksi metsävaurioiden kartoitusmenetelmäksi. Ohjeet ovat kuitenkin melko väljät, joten eri valtiot ovat voineet soveltaa menetelmien yksityiskohtia omien tarpeidensa mukaisesti. Tällä hetkellä Euroopan metsäpinta-alan 176 miljoonasta hehtaarista (entisen Neuvostoliiton alue ei ole mukaanluettuna) on 116 miljoonaa hehtaaria eli 66 % kartoituksen piirissä. Kaikkiaan 360 000 puuta on arvioitu yhteensä 32 000 koealalta.

Kuvassa 76 esitetään kaikkien puulajien keskimääräinen harsuuntuneisuus Euroopassa. Italian tulos koskee vain alle 60-vuotiaita puita, ja Ruotsin ja Norjan tulokset ainoastaan havupuita. Tähdellä (*) merkityillä alueilla ilmansaasteita pidetään keskeisenä harsuuntumisen aiheuttajana.

Havupuiden käpysato 1987–89

Hedelmällisyys on tärkeä osa puiden elinvoimaisuutta. Hede- ja emikukkien tuottamiseen ja elinkykyisten siemenien kehittymiseen vaikuttavat sekä perintötekijät että ympäristötekijät.

Havupuiden käpysato vaihteli suuresti vuosittain ja alu-



Kuva 76. Euroopan metsien harsuuntuneisuus 1989.

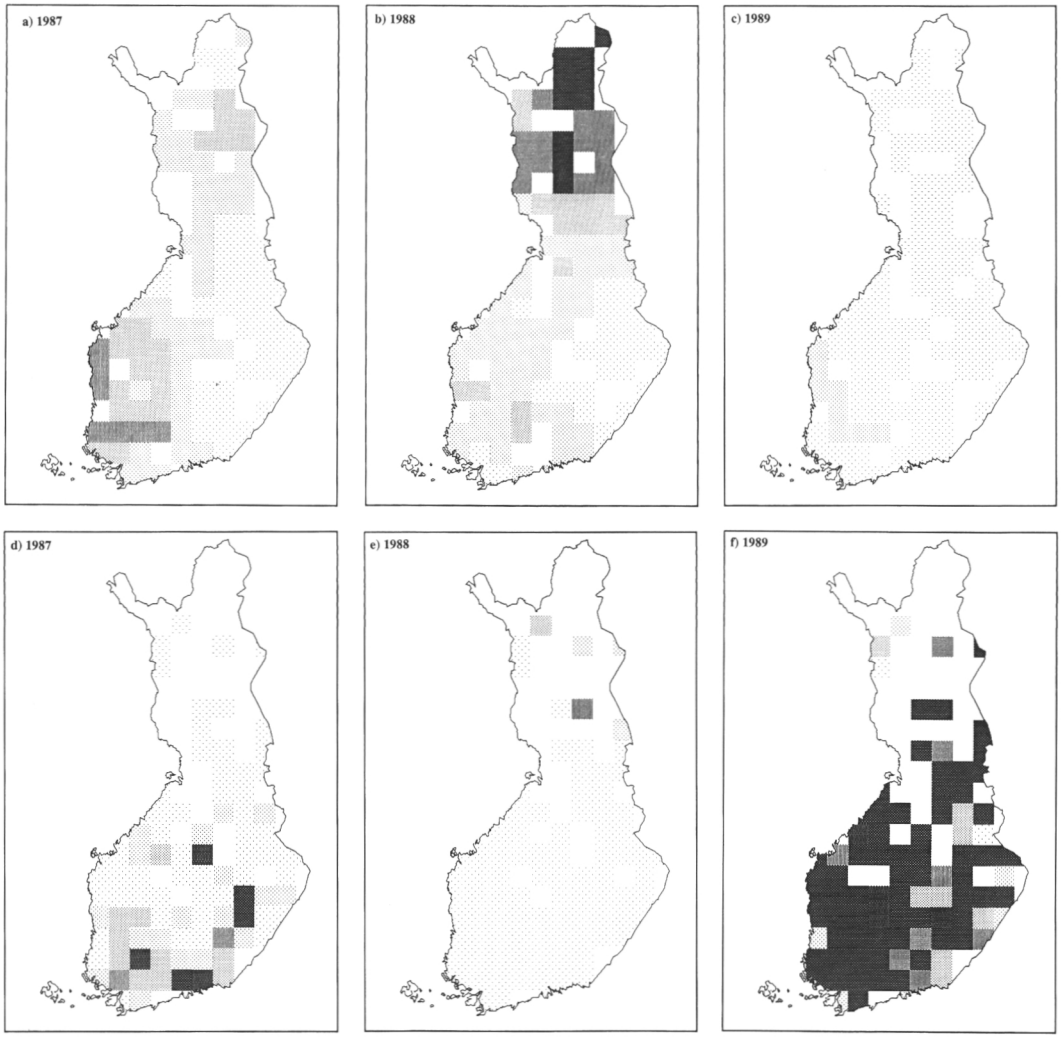
eittain (kuva 77). Männyn paras käpysato oli vuonna 1988 Pohjois-Suomessa. Kuusen käpysato taas oli ennätyksellisen hyvä vuonna 1989 koko maassa; eniten käpyjä kasvattivat Pohjois-Pohjanmaan kuuset, keskimäärin 70 käpyä latvuksen ylimmässä neljänneksessä.

Kuusen harsuuntuneisuuden ja käpysadon suhdetta tarkasteltiin vuoden 1989 aineiston avulla. Kuvassa 78 esitetään käpyjen määrä yli 80-vuotiaissa metsissä Kainuun itäosissa ja Lounais-Suomessa. Käpysadon ja harsuuntuneisuuden välillä ei havaittu selvää yhteyttä. Harsuuntuneilla puilla ei ollut enempää käpyjä kuin tuuhealatvaisillakaan. Käpyjen määrä vaihteli suuresti myös harsuuntuneisuudeltaan samanlaisten puiden kesken.

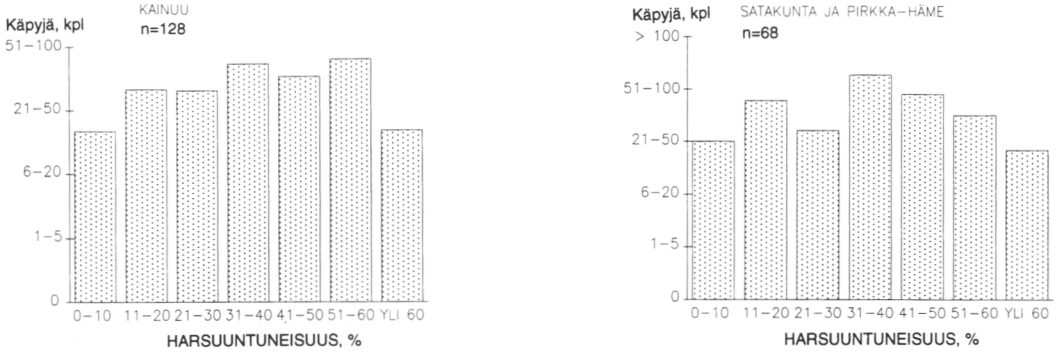
Kuusen suureen käpysatoon vuonna 1989 vaikutti puiden sisäisen rytmiikan lisäksi suuresti edellisen kesän lämpimyys. Vastaava tilanne oli vuonna 1973, jolloin kuusen hyvää käpysatoa edelsi myös lämmin kesä.

Aiheesta enemmän

Koski, V. & Tallqvist, R. 1978. Tuloksia monivuotisista kukinnan ja siemensadon määrän mittauksista metsäpuilla. Folia Forestalia 364. 60 s.



Kuva 77. Männyn (a–c) ja kuusen (d–f) käpysato vuosina 1987–89. Keskimääräinen käpymäärä puiden latvuksen yläpuoliskosta (ruutu 50 km x 50 km). Käpymäärä arvioitiin yhdeltä puolelta latvusta. Laskennassa oli mukana myös kävyttömät puut, mikä pienentää keskiarvoja. Kartoissa tummimmilla alueilla oli yli 50 käpyä, vaaleilla alueilla alle 10 käpyä puuta kohden. Valkeilta alueilta tiedot puuttuvat.



Kuva 78. Kuusen käpymäärä eri harsuuntumisluokissa.

4.3 Ilmansaasteiden vaikutukset neulasten solurakenteeseen

Puustovaurioiden syiden selvittämiseksi tarvitaan perustietoa tuhon- ja vaurionaiheuttajien vaikutusmekanismeista sekä niiden keskinäisistä vuorovaikutuksista. Esimerkiksi altistamalla puut kontrolloiduissa oloissa ilman epäpuhtauksille voidaan saada perustietoa niiden vaikutuksesta.

Aikaisemmin altistuskokeissa puita kaasutettiin suurilla saastemäärillä (useita satoja $\mu g/m^3$) lyhyen aikaa (muutamasta tunnista muutamaan vuorokauteen). Tällaisilla kokeilla on kuitenkin vaikea arvioida ilmansaasteiden vaikutuksia puihin luonnossa, jossa pienet saastepitoisuudet vaikuttavat pitkän aikaa, vuodesta toiseen. Uusimmissa altistuskokeissa onkin pyritty käyttämään tutkittavalla alueella tavattavia saastepitoisuuksia.

Myös altistusaikaa on pyritty pidentämään mahdollisimman hyvin todellista tilannetta vastaavaksi. Lisäksi on tutkittu eri saasteiden yhteisvaikutuksia sekä luonnon omien stressitilanteiden, kuten pakkasen tai kuivuuden vaikutuksia yhdessä saasteiden kanssa. Tutkimuksissa on pyritty selvittämään mm. vaikuttavatko luonnossa tavattavat alhaiset saastepitoisuudet haitallisesti puihin. Solurakennetutkimuksessa selvitetään, millaiset stressitekijät aiheuttavat oireita puiden neulassoluissa ja voidaanko näitä oireita käyttää hyväksi luonnossa ilmenevien vauriotapauksien syiden selvittämisessä.

Koejärjestelyt

Tutkimuksessa havupuita altistettiin eri saastepitoisuuksille ja puista kerättyjen neulasten rakennetta ja rakenteen muutoksia tarkasteltiin mikroskoopilla. Tulokset perustuvat seuraavista neljästä kokeesta tutkittuihin näytteisiin:

1. Otsoni- ja rikkidioksidikaasutukset laboratoriossa kuusentaimilla (Neuherberg, Saksan Liittotasavalta, 1985–86). Ilman otsonipitoisuudet olivat 40–300 $\mu g/m^3$ ja päivittäiset altistusajat 3–9 tuntia. Rikkidioksidipitoisuudet olivat 30 ja 150 $\mu g/m^3$ ja päivittäiset altistusajat 3 ja 24 tuntia. Altistuksia tehtiin kahden kuukauden ajan yhtäaikaa kahdeksassa kammiossa, joiden kasvuolot vastasivat muutosta syksystä talveen keski-eurooppalaisissa oloissa.
2. Otsonikaasutukset katottomissa kammioissa kuusella (Birmensdorf, Sveitsi 1987). Otsonipitoisuudet vaihtelivat ympäröivän ilman pitoisuuksista 200 $\mu g/m^3$:aan. Päivittäinen altistusaika oli 24 tuntia ja altistuksia jatkettiin yhden kasvukauden ajan.
3. Otsoni- ja typpihappokaasutukset (HNO_3) katottomissa kaasutuskammioissa männyllä ja kuusella (Göteborg, Ruotsi 1985–90). Tutkimuksessa selvitettiin myös maaperän kuivuuden vaikutuk-

sia. Otsonikaasutukset aloitettiin vuonna 1985 ja typpihappokaasutukset vuonna 1987. Saastepitoisuudet olivat 50–100 µg/m^3 ja päivittäinen altistusaika seitsemän tuntia. Altistuksia jatkettiin kunakin kasvukautena noin kolme kuukautta.

4. Hapansadetus- ja talveentumiskokeet männyllä (Suonenjoki, 1988). Kokeessa sadetettiin keinotekoisesti happamoitetulla vedellä (pH 3,0–5,6) männyntaimia yhden kasvukauden ajan kaksi tai kolme kertaa viikossa. Syksyllä talveentumista seurattiin altistamalla sekä happamalla vedellä että tavallisella vedellä kasteltuja taimia eri lämpötiloille. Jokaisessa käsittelyssä oli mukana myös pakkasasteita, joiden tiedettiin olevan talveentumisvaiheessa oleville taimille haitallisia.

Jokaisessa altistuskokeessa oli mukana myös ns. kontrollikaasutus, jossa puille annettiin suodatettua ilmaa. Useimmilla tutkimuspaikkakunnilla tämä onkin välttämätöntä, koska niiden ilmassa on huomattavia määriä epäpuhtauksia. Ilmansaastepitoisuuksia seurattiin jatkuvasti jokaisessa kaasutuskammiossa. Kussakin kokeessa tutkittavat kuuset olivat samaa kloonia eli ne olivat perintötekijöiltään täysin samanlaisia. Mikroskooppiseen tarkasteluun kerättiin vain vihreitä neulasia.

Suodatettua ilmaa saaneiden neulasten solurakenne

Kaikissa altistuskokeissa suodatettua ilmaa saaneiden kuusten neulasten solurakenne oli ehjä kaikkina vuodenaikoina. Tällöin solujen viherhiukkaset olivat linssin muotoisia, niiden strooma eli perusmassa oli vaalea, ja siinä oli vähän plastoglobuleita (pieniä rasvapallosia) ja hyvin kehittynyt yhteyttävä kalvosto. Solulima ja muut soluelimet kuten mitokondriot ja mikrobodit olivat myös ehjiä.

Alkukeväästä loppusyksyyn viherhiukkaset olivat solujen seinämillä ja jokaisessa oli yksi tärkkelysjyvänen (kuva 79). Kesällä tärkkelysjyvänen oli niin suuri, että se saattoi täyttää koko viherhiukkasen. Talvella viherhiukkaset olivat kasaantuneet johonkin osaan solua. Niissä ei ollut tärkkelystä, mutta muuten niiden rakenne oli samanlainen kuin kesällä (kuva 80). Talvella ja kevättalvella oli kuitenkin havaittavissa etenkin neulasten uloimmissa solukerroksissa viherhiukkasten yhteyttävän kalvoston vähenemistä. Tällöin yhteyttävissä kalvopinoissa eli graanoissa saattoi olla vain kaksi kalvoa päällekkäin normaalin viiden tai useamman kalvon sijaan. Kesällä kalvosto palautui normaaliksi.

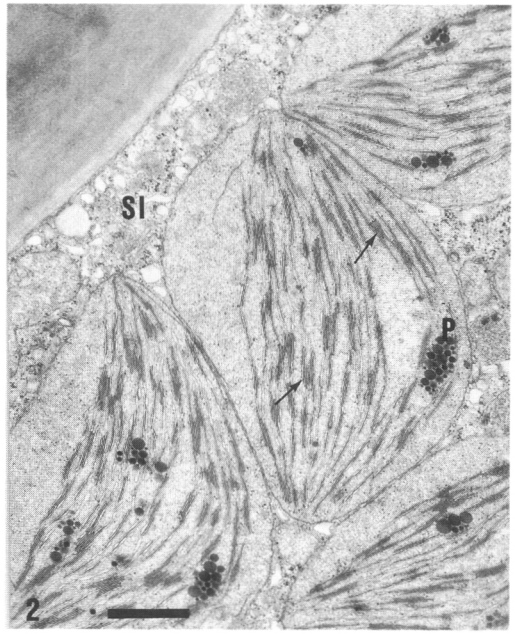
Kuivuuden aiheuttamia solurakennemuutoksia neulasissa

Osaan ylhäältä avoimiin, suodatettua ilmaa saaviin kaasutuskammioihin oli aiheutettu keinotekoinen kuivuus siten, että sateentulo estettiin katolla. Katto rakennettiin siten, että se ei estänyt ilmavirtausta kammiossa. Jo kokeen perustamisvaiheessa näiden kammioiden maa oli eristetty ympäröivästä maasta. Tilannetta seurattiin yhden kasvukauden ajan. Puut kasteltiin ensimmäisen kerran heinäkuun viimeisenä päivänä, ja tämän jälkeen aiheutettiin uusi kuivakausi myöhemmin syksyllä. Keväällä kokeen alussa neulasten solujen viherhiukkaset olivat samanlaisia kuin normaalisti kastelluissa puissa (kuvat 79 ja 80).

Keväästä heinäkuun loppuun jatkuneen kuivan kauden jälkeen viherhiukkasissa ei ollut juuri lainkaan tärkkelysjyväsiä, jotka hyvin kastelluiden puiden neulasten viherhiukkasissa samaan aikaan olivat suuria. Lisäksi viherhiukkasten linssimäinen muoto oli muuttunut lähes tai täysin pyöreäksi. Strooma oli tumma ja yhteyttävää kalvostoa oli enemmän kuin hyvin kasteltujen puiden neula-



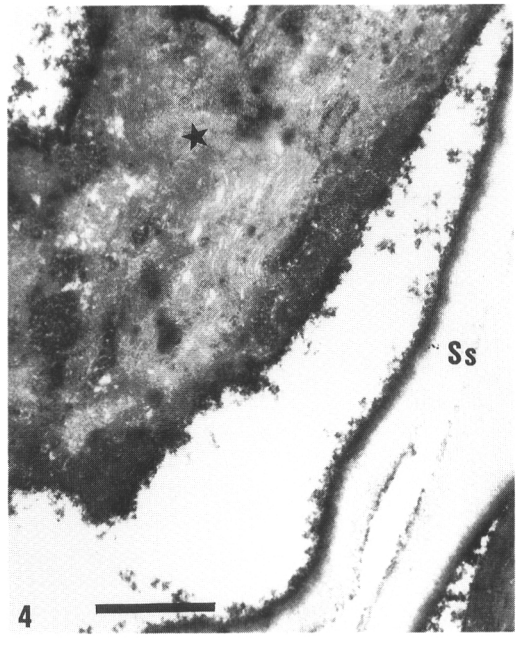
Kuva 79. Suodatettua ilmaa kaasutuskammiossa saaneen kuusen neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkasia. Neulanen on syntynyt vuonna 1985, näyte kerätty 3.4.1987 (Göteborg). Viherhiukkasten yhteyttävä kalvosto (nuolet) on hyvin kehittynyt. Perusmassa eli strooma (*) on vaalea ja siinä erottuu rasvapallosia, plastoglubuleita (P) sekä suurehko tärkkelysjyvänen (Tj). Solulima (Sl) on normaali. Jana = 1 µm.



Kuva 80. Suodatettua ilmaa kaasutuskammiossa saaneen kuusen neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkasia talvella. Neulanen on syntynyt vuonna 1985, näyte kerätty 20.1.1987 (Göteborg). Viherhiukkasissa erottuu hyvin kehittynyt yhteyttävä kalvosto (nuolet). Strooma on vaalea ja siinä on vähän plastoglobuleita (P). Solulima (Sl) on normaali. Jana = 1 µm.



Kuva 81. Suodatettua ilmaa saaneessa kammiossa kasvaneen, kuivuudesta kärsineen kuusen neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkanen. Neulanen on syntynyt vuonna 1985, näyte kerätty 30.7. 1986 (Göteborg). Maaperän kuivuus on aiheuttanut viherhiukkasen pyöristymistä. Strooma on tumma ja siinä erottuu erittäin paksut yhteyttävät kalvopinot (Kp). Tärkkelystä ei ole, vaikka hyvin kastelluissa vertailupuissa tärkkelysjyväset täyttivät lähes koko hiukkasen. Jana = 1 µm.



Kuva 82. Kylmäkäsitellyn männyn neulasen yhteyttävää solukkoa. Neulanen syntynyt 1988, näyte kerätty 26.9.1988 (Suonenjoki). Solunsisältö näkyy tummana massana (*), joka on irronnut soluseinästä (Ss). Jana = 1 µm.

sissa (kuva 81). Viikko kastelun jälkeen viherhiukkasissa oli jo pienet tärkkelysjyväset kaikkialla yhteyttävässä solukossa. Syksyinen kuivuus näkyi lievempänä viherhiukkasten pyöristymisenä kuin kesäisen kuivuuden aikana. Talveksi solurakenne oli palautunut lähes normaaliksi.

Pakkaskäsiteltyjen neulasten solurakenne

Männyn taimien kylmänkestävyyden kehittymistä selvittävässä kokeessa liiallisen kylmyyden vaikutuksesta solukalvo irtosi soluseinästä. Samanaikaisesti solunsisältö kokonaisuudessaan painui kasaan ja oli nähtävissä enemmän tai vähemmän yhtenäisenä tummana massana (kuva 82). Samanlaisia oireita on aikaisemmin havaittu liiallisen typpilannoituksen jälkeisissä kylmyyden aiheuttamissa vaurioissa kuusen neulasissa.

Otsonialtistusten aiheuttamat solurakennemuutokset neulasissa

Kaikissa otsonikaasutuskokeissa neulasten solumuutokset olivat samanlaisia, ja ne näkyivät ensin neulasten yläpinnan uloimmissa solukerroksissa. Tämän jälkeen vaurioalue eteni asteittain kohti neulasten alapinnan solukkoa.

Asteittainen vaurioituminen oli nähtävissä myös yksittäisissä soluissa. Hienorakennevauriot näkyivät ensin viherhiukkasissa, jotka alkoivat pienentyä. Viherhiukkasen pienentyessä strooma alkoi muuttua tummaksi ja rakeiseksi (kuva 83). Samanaikaisesti tärkkelysjyväset pienenivät tai hävisivät kokonaan. Tärkkelysjyvästen pieneneminen viittaa yhteyttämisen vähenemiseen, joka voitiinkin osoittaa kaasunvaihtomittauksilla. Lisäksi plastoglobulit lisääntyivät voimakkaasti etenkin neulasen yläpinnalla. Viherhiukkasmuutokset saattoivat olla hyvinkin voimakkaita ennen kuin seuraava soluelin, mikrobodi, alkoi vaurioitua. Tämän jälkeen vaurioitui solulima ja viimeiseksi mitokondriot.

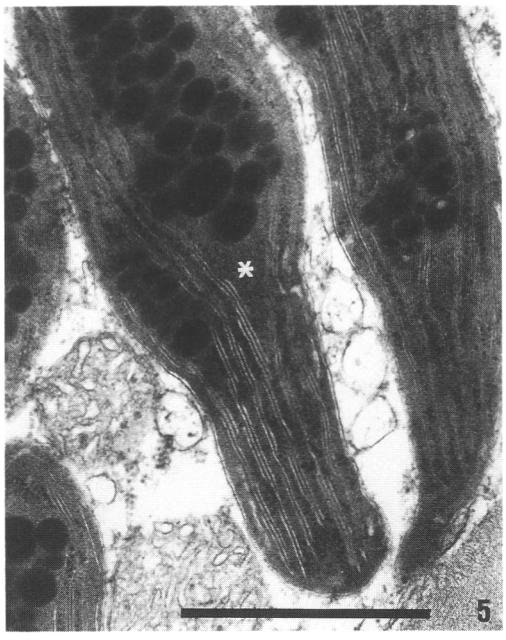
Happaman sateen ja typpihappokaasutuksen aiheuttamat solurakennemuutokset neulasissa

Happaman sateen ja HNO_3-käsittelyn aiheuttamat ensimmäiset muutokset näkyivät solukalvon ja soluliman voimakkaana rakkuloitumisena. Samanaikaisesti solulimaan kerääntyi rasvan kaltaista ainetta suurina kasaumina. HNO_3-käsitellyissä neulasissa viherhiukkasten muutokset rajoittuivat lähinnä plastoglobulien lisääntymiseen sekä niiden värin ja muodon muutoksiin (kuva 84).

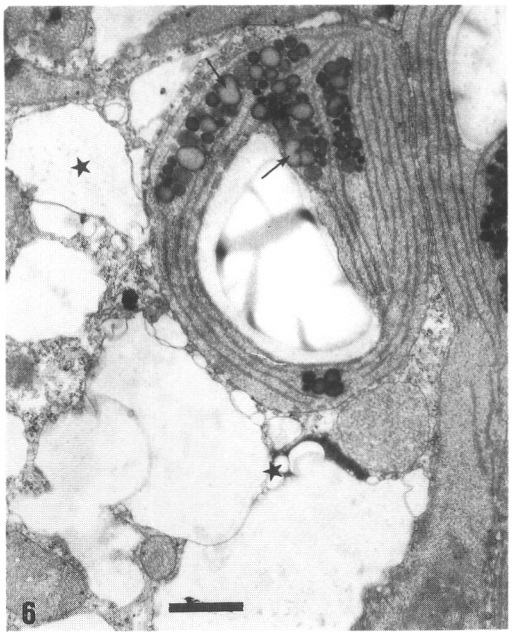
Hapan sade aiheutti viherhiukkasten yhteyttävien kalvojen turpoamista soluvaurion loppuvaiheessa. Soluvaurio oli nähtävissä koko neulasessa, eli samanlaista asteittain etenevää solukkovauriota kuin otsonialtistusten yhteydessä ei havaittu. Lisäksi vauriot olivat voimakkaammat nuorimmissa neulasissa, kun taas otsonikäsittelyn yhteydessä vauriot olivat pahimmat vanhemmissa neulasissa.

Yhtäaikaisen otsoni- ja rikkidioksidikaasutuksen aiheuttamat solurakennemuutokset neulasissa

Yhteiskaasutus otsonilla ja rikkidioksidilla aiheutti neulasiin samat mutta huomattavasti voimakkaammat oireet kuin pelkkä otsonikaasutus. Lisäksi vauriossa oli rikkidioksidikaasutuksen aiheuttamia lisäoireita. Kun otsonia oli vähän (40 $\mu g/m^3$) ja sen päivittäinen altistusaika pitkä ja



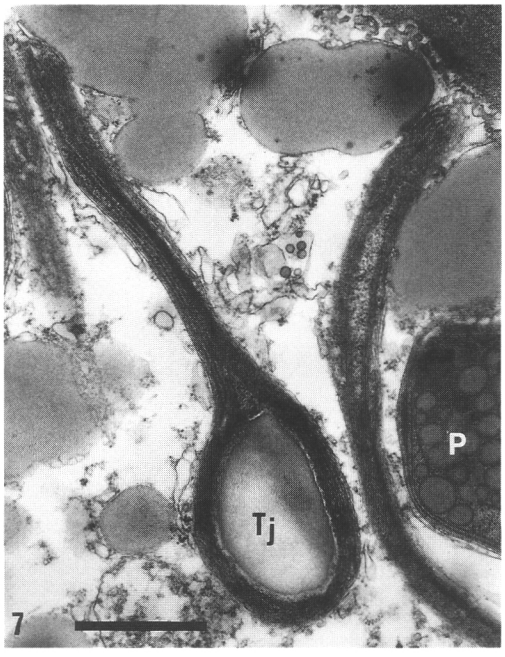
Kuva 83. Otsonilla kaasutetun kuusen neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkasia. Neulanen on syntynyt 1984, näyte kerätty 31.1.1986 (Neuherberg) kammiosta, jonne oli kahden kuukauden ajan johdettu otsonia 150 µg/m^3 kolme tuntia vuorokaudessa. Viherhiukkaset ovat pieniä, niiden strooma (*) on tumma ja rakeinen. Jana = 1 µm.



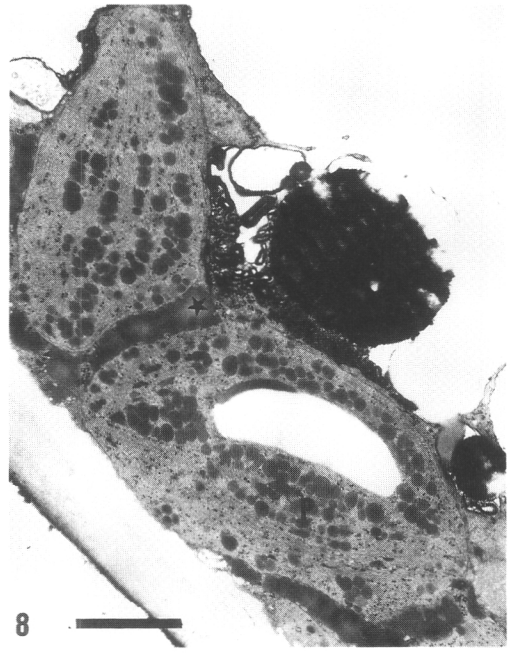
Kuva 84. HNO_3:lla kaasutetun kuusen neulasen yhteyttävää solukkoa. Neulanen on syntynyt vuonna 1987, näyte kerätty 14.3.1988 (Göteborg) kammiosta, jonne johdettiin HNO_3:a kesällä 1986. Viherhiukkaset ovat normaalin kokoisia ja strooma vaalea, mutta plastoglobulit ovat epämääräisen muotoisia (nuolet). Solulima on voimakkaasti rakkuloitunut (*). Jana 1 = µm.

rikkidioksidia suhteellisen paljon (150 µg/m^3) kolme tuntia päivittäin, havaittiin otsonioireiden lisäksi plastoglobulien muodon muuttuminen normaalista pyöreästä epämääräiseksi. Myös solulima ja muut soluelimet olivat usein hajonneet.

Neulasissa, jotka saivat 150 µg/m^3 otsonia kolme tuntia vuorokaudessa ja samanaikaisesti 30 µg/m^3 rikkidioksidia läpi vuorokauden, viherhiukkaset olivat erittäin pieniä, mutta solulima ja muut soluelimet olivat suhteellisen terveen näköisiä. Lisäksi viherhiukkaset olivat joko matomaisia, pyöreitä tai nuijapään muotoisia. Pyöreät viherhiukkasten osat olivat täynnä plastoglobuleita ja usein vailla yhteyttäviä kalvopinoja (kuva 85).



Kuva 85. Otsonilla ja rikkidioksidilla kaasutetun kuusen neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkasia. Neulanen on syntynyt vuonna 1984, näyte kerätty 13.1.1986 (Neuherberg) kammiosta, jonne johdettiin 150 µg/m^3 otsonia kolme tuntia vuorokaudessa sekä 30 µg/m^3 rikkidioksidia ympäri vuorokauden kahden kuukauden ajan. Viherhiukkaset ovat erittäin pieniä, tummia ja poikkeavan muotoisia. Yhdessä viherhiukkasessa näkyy pieni tärkkelysjyvänen (Tj), toisessa runsaasti plastoglobuleita (P). Jana = 1 µm.



Kuva 86. Otsonilla ja HNO_3:lla kaasutetun kuusen neulasen yhteyttävän solukon viherhiukkasia. Neulanen on syntynyt vuonna 1987, näyte kerätty 14.3. 1988 (Göteborg) kammiosta, jonne oli johdettu vuorokaudessa seitsemän tunnin ajan 100 µg otsonia ja HNO_3:a kesällä 1987. Viherhiukkaset ovat pieniä, tummia ja rakeisia. Plastoglobulit (P) ovat lisääntyneet ja ne ovat epämääräisen muotoisia. Solulimassa näkyy rasvankaltaisen aineen (*) kasaumia. Jana = 1 µm.

Yhtäaikaisen otsoni- ja typpihappokaasutuksen aiheuttamat solurakennemuutokset neulasissa

Myös tässä yhteiskaasutuksessa havaittiin samanaikaisesti otsonikaasutukselle sekä HNO_3-kaasutukselle ominaiset oireet. Viherhiukkaset olivat pienentyneitä, perusmassaltaan tummia ja rakeisia. Samoissa soluissa näkyi lisäksi typpihapolle ominaiset oireet eli soluliman rakkuloituminen ja rasvankaltaisen aineen keräytyminen. Viherhiukkasten plastoglobulit olivat epämääräisen muotoisia ja usein vaaleita (kuva 86).

Johtopäätöksiä

Ilman saasteet luonnossa tavattavina pitoisuuksina voivat kokeiden mukaan vaurioittaa neulasten solurakennetta. Vaurioita oli myös täysin vihreissä neulasissa ja täysin

terveennäköisissä puissa. Erilaiset stressitekijät ilmenivät solukko- ja solutasolla kullekin tekijälle ominaisena muutoksena. Vaikka kaikkien mahdollisten ympäristötekijöiden solutasoisia vaikutuksia ei tunneta, jo nykyisenkin tiedon pohjalta voidaan kohtuullisen tarkasti selvittää, mihin vaurioittavaan tekijään neulasten solumuutokset viittaavat.

Aiheesta enemmän

Sutinen, S. 1988. Pitkäaikaisen otsonikaasutuksen vaikutuksista kuusen neulasen hienorakenteeseen ja fotosynteesiin. Solubiologi 3b: 15–20.

5. Metsätuhojen esiintyminen

5.1 Metsiemme tärkeimpiä sienitauteja ja tuholaisia

Yleisimpiä metsien sienitauteja

Juurikääpä on lahottajasieni, joka aiheuttaa kuusella maannousemaksi kutsuttua tyvilahoa ja männyllä juurten ja tyven tervastumiseen johtavaa tyvitervastautia sekä juurilahoa. Juurikääpä on Etelä-Suomessa kuusen vaarallisimpia lahottajasieniä. Lahot kuuset voivat ulospäin näyttää täysin terveiltä, mutta joskus niissä havaitaan tyvellä pihkavuotoa, kasvu saattaa vähetä äkillisesti ja latvus supistua. Tällöin puun latvus muuttuu harsuuntuneeksi.

Kesäaikaiset hakkuut ja korjuun yhteydessä syntyvät vauriot mahdollistavat juurikäävän leviämisen itiöiden päästessä terveisiin puihin. Puiden välillä vallitsevien juuriyhteyksien kautta sieni voi myös rihmastonsa välityksellä levitä puusta toiseen.

Varsinkin Etelä-Suomen kuusikoissa esiintyy juurikäävän kanssa usein mesisieni. Mesisienten kuusessa aiheuttama laho rajoittuu yleensä puun tyviosaan. Männynmesisieni puolestaan tappaa männyn taimia erityisesti maan eteläosan kuivilla kankailla.

Tervasroso tappaa täysikasvuisten mäntyjen latvoja, mutta sitä esiintyy myös pienissä taimissa ja oksissa. Tervasrosoa aiheuttaa meillä kaksi ruostesientä (*Cronartium flaccidum* ja *Endocronartium pini*), ja eri mänty-yksilöiden välillä on huomattavia eroja taudinkestävyydessä.

Versoruoste on yleisimpiä männyn taimikoiden tauteja, jonka toinen isäntäkasvi on haapa. Männyn viimeisimpään vuosikasvaimeen kesäkuussa syntyvän sienen itiöpesäk-



Kuva 87. Männynversosurma. Valokuva: Seppo Nevalainen.

keen aiheuttaman arven vuoksi taimesta tulee mutkainen ja haarainen. Ankaran taudin jälkeen puun pituuskasvu voi merkittävästi hidastua.

Männynversosurman aiheuttaa surmakka eli versosyöpä, joka on kotelosieni. Tauti tartuttaa kevään ja kesän aikana neulasia, silmusuomuja tai esimerkiksi lumen aiheuttamia oksahaavaumia. Kasvukauden aikana puu pystyy estämään infektion etenemisen, mutta lepokauden aikana sieni valtaa puun elävää solukkoa, ja tauti tulee näkyväksi tartuntaa seuraavana keväänä.

Tautia esiintyy hyvin yleisesti männiköissä latvuksen alaosissa. Vakavammassa tautityypissä ruskettuneita tai jo neulasettomia kasvaimia on myös latvuksen muissa osissa (kuva 87). Latvakasvaimen sairastuminen johtaa latvanvaihtumiseen.



Kuva 88. Juovakaristetta kuusen neulasilla. Kuvattu kevättalvella lähes kahden vuoden kuluttua tartunnasta. Valokuva: Joensuun yliopiston kuvalaitos.

Versosurmaa tavataan männiköissä varsinkin pienilmastoltaan kylmillä kasvupaikoilla, esimerkiksi painanteissa, suppakuopissa, puronotkoissa ja Pohjois-Suomen korkeiden alueiden kuusikoiden uudistusaloilla. Sieni aiheuttaa myös taimitarhatuhoja.

Havupuiden neulasissa esiintyy lukuisia neulasten ennenaikaista varisemista aiheuttavia sieniä. Yleensä niiden tartunta tapahtuu nuorimpiin neulasiin, vaikka neulaset voivat joissakin tapauksissa karista vasta parin, kolmen vuoden kuluttua. Neulastauteina esiintyy sekä kantasieniin kuuluvia ruostesieniä että karisteita, joista useimmat ovat kotelosieniä.

Suopursuruoste aiheuttaa kuusen uusimpien neulasten kellastumisen ja karisemisen. Sienen itiöpesäkkeet värjäävät kuuset huomiota herättävän oranssinkeltaisiksi.

Kuusen neulaskaristesienet aiheuttavat neulasten ruskettumista. *Lophodermium picea*-lajin tartuttamat neulaset ovat kauttaaltaan ruskeita-ruosteenruskeita, ja niissä on havaittavissa pieniä itiöemiä sekä useimmiten selviä poikkivöitä. Juovakariste tartuttaa aivan nuoria kuusenneulasia. Noin vuoden kuluttua neulaset ruskettuvat ja kahden vuoden ikäisissä, harmaanruskeissa neulasissa pitkänomaiset, mustat itiöemät ovat selvästi näkyvissä (kuva 88).

Kuusen neulasissa voi neulasten värimuutoksia aiheuttaa myös *Rhizosphaera kalkhoffii*-sieni. Taudin oireita esiintyy kaiken ikäisissä neulasissa. Sairastuneissa neulasissa havaitaan keväällä värimuutosta ja myöhemmin ne muuttuvat purppuran ruskeiksi. Tämän taudin tiedetään runsastuneen mm. Japanissa eräällä mäntylajilla ilmansaas-

teiden vaikutuksesta.

Karisteisiin kuuluva männyn lumihome on yleinen tauti männyntaimikoissa. Saastuneet neulaset ruskettuvat keväällä lumen alta paljastuttuaan ja harmaantuvat kesän aikana. Tauti leviää talvella vain lumen pinnan alapuolella oleviin neulasiin. Männyn neulaskariste aiheuttaa tuhoja taimikoissa ja taimitarhoilla. Syksyllä sairastuneet neulaset ruskettuvat alkukesällä ja karisevat maahan. Harmaakariste on männyn tauti, joka aiheuttaa nuorissa puissa kasvutappioita. Se havaitaan yleensä syksyllä tai varhain keväällä, kun nuorin neulaskerta on muuttunut punaruskeaksi tai harmahtavaksi. Alkukesällä sairastuneet neulaset karisevat pääasiassa seuraavan vuoden loppukesän aikana.

Aiheesta enemmän

Metsänterveysopas 1988. Metsätuhot ja niiden torjunta. Helsinki. 168 s.

Yleisimpiä metsien tuholaisia

Tukkimiehentäi on merkittävimpiä männyntaimien tuholaisia (kuva 89). Aikuiset kovakuoriaiset aiheuttavat suurta tuhoa nakertelemalla taimien kuorta. Tukkimiehentäi tappaa Suomessa keskimäärin joka viidennen istutetuista suojaamattomista männyntaimista. Pikikärsäkkäät osallistuvat usein heikentyneiden puiden tai taimien kuivattamiseen nakertelemalla kuoreen pieniä reikiä.

Ytimennävertäjät, pystynävertäjä ja vaakanävertäjä, esiintyvät yleisesti seuraustuholaisina ja saattavat tappaa muiden hyönteisten heikentämiä mäntyjä. Muita heikentyneissä havupuissa eläviä, yleensä runsaana esiintyviä ja metsätaloudellisesti enemmän tai vähemmän merkittäviä kovakuoriaisia ovat kiiltokuusijäärä, ukkoniluri, juuriniluri, monikirjaajat, kuusenoksakirjaaja, tähtikirjaajat sekä kirjanpainajat (kuva 90).

Punalatikka on erityisesti heikentyneissä nuorissa männyissä elävä lude, joka imennällään hidastaa taimien kasvua. Lajin tiedetään esiintyvän runsaana etenkin harjualueilla. Ruskomäntypistiäistä ja pilkkumäntypistiäistä tavataan ajoittain metsätalouden kannalta merkittävinä massaesiintymisinä, joiden tiedetään olevan yhteydessä isäntäpuiden stressiin. Perhosista mahdollisia tuhonaiheuttajia ovat esimerkiksi mäntymittari ja mänty-yökkönen.

Nisäkkäistä hirvi ja myyrät ovat aiheuttaneet metsätuhoja paikoittain erityisesti taimikoissa. Aluskasvillisuuden muutokset saattavat vaikuttaa myyrien runsauteen.



Kuva 89. Tukkimiehentäi elää toukkana havupuiden kantojen juurissa. Aikuiset nakertelevat havupuiden taimia. Valokuva: Kari Heliövaara.



Kuva 90. Kuusentähtikirjaaja on hyvin runsaana esiintyvä kaarnakuoriainen, mutta sen aiheuttamat tuhot metsissä ovat vähäisiä. Lajin syömäkuvio on tähtimäinen. Valokuva: Kari Heliövaara.

Aiheesta enemmän

Metsänterveysopas 1988. Metsätuhot ja niiden torjunta. Helsinki. 168 s.
Nuorteva, M. 1982. Metsätuholaiset. Rauma. 91 s.

5.2 Sieni-, eläin- ja abioottisten tuhojen yleisyys

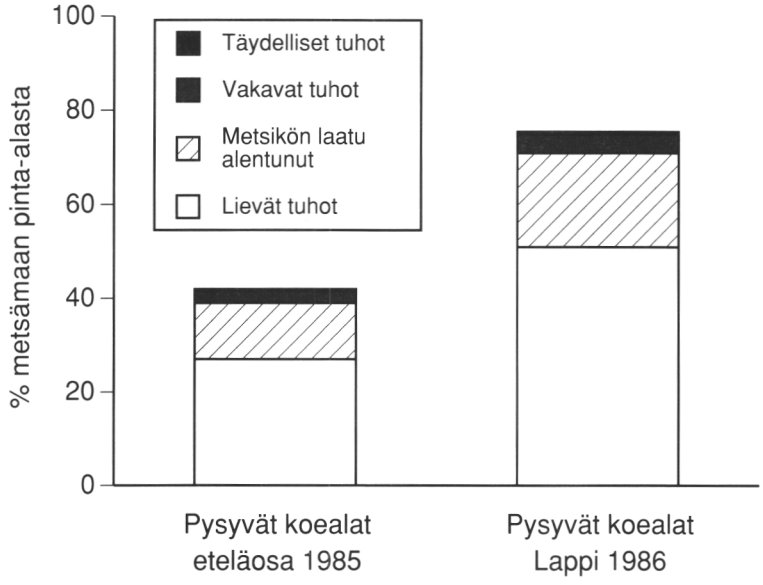
Valtakunnalliset tulokset

Valtakunnan metsien kahdeksannen inventoinnin (VMI8) yhteydessä kertainventoinnin koealoilla sekä kaikilla pysyvillä koealoilla (ks. liite 1) on arvioitu erilaisten tuhojen määrä, vaurio-oire ja aiheuttaja. Vuosien 1985–86 inventoinneissa havaittiin pysyvillä 3009 koealalla tuhoja joka toisessa tutkitussa metsikössä. Eniten tuhoja oli Lapissa, noin 75 %:lla metsämaasta, muualla Suomessa noin 40 %:lla metsämaasta. Eteläisimmässä Suomessa vuosina 1986–89 mitatuilla VMI:n kertainventoinnin koealoilla tuhoja havaittiin puolestaan 31 %:lla metsämaasta (kuva 91). Valtaosa tuhoista oli kuitenkin lieviä eikä alentanut metsikön laatua.

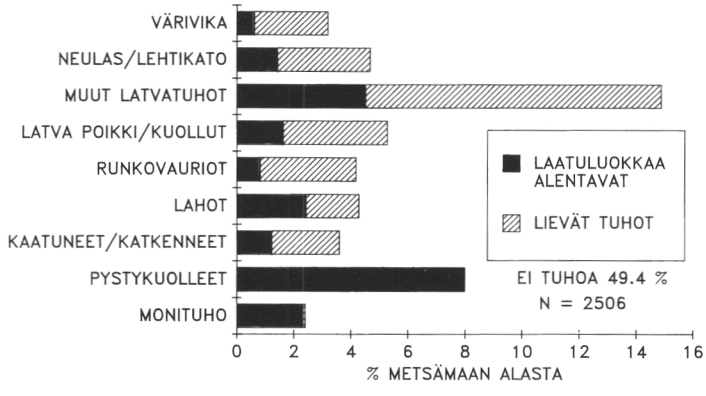
Tutkituista puista oli vakavasti vaurioituneita ja kuolevia tai kuolleita puita vähän. Tuhojen arvioinnissa otettiin huomioon vain tärkein tuho, vaikka samassa metsikössä tai puussa saattoi olla usean tekijän aiheuttamaa tuhoa.

Yleisimpiä vikoja olivat erilaiset latvavioitukset, runkovauriot sekä neulasvauriot (kuva 92). Lähes kaikkia vikoja tavattiin pysyvillä koealoilla enemmän Lapissa kuin Etelä-Suomessa. Lapissa oli pystyyn kuolleita puita 13 %:lla metsämaasta, muualla maassa 6 %:lla. Vastaavasti koepuista oli Lapissa kuollut pystyyn 2 % ja muualla Suomessa 0,5 %.

Eri pääpuulajin metsiköissä oli selvästi erilaiset tuhotyypit. Kertainventointien mukaan lahoa oli 7 %:ssa kuusikoista mutta vain 1 %:ssa männiköistä. Mäntyvaltaisissa metsiköissä havaittiin vastaavasti enemmän neulastuhoja (9 %), pystyyn kuolleita puita (5 %) ja erilaisia latvavioituksia (12 %).



Kuva 91. Eriasteisten tuhojen esiintyminen metsissä VMI8:n pysyvien koealojen mukaan. Täydellisesti tuhoutuneita eli uudistamista vaativia metsiköitä oli 0,1–0,3 % metsämaan pinta-alasta. Kuolleita tai kuolevia puita oli koealoilla 1–4 %.



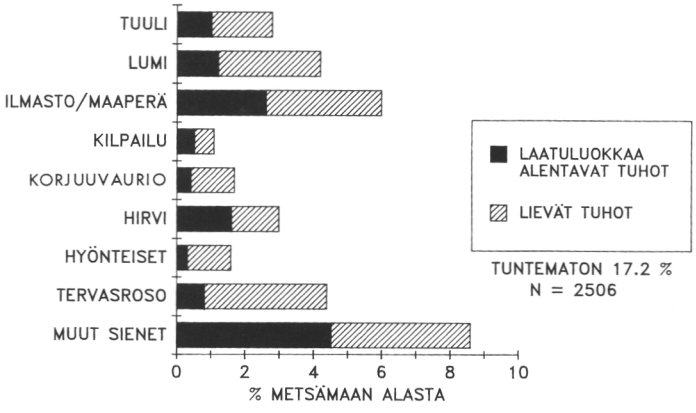
Kuva 92. Eri vaurioaireisten puiden osuudet valtakunnan metsien inventoinnin pysyvillä koealoilla 1985–86.

Sienituhot ja abioottiset tuhot ovat yleisimpiä

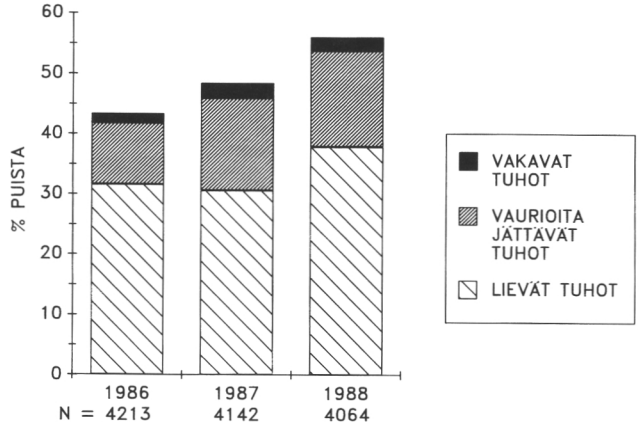
Sienituhot ja abioottiset tuhot olivat merkittävimpiä tunnistetuista tuhonaiheuttajaryhmistä pysyvillä koealoilla (kuva 93). Kertainventointien perusteella tärkeimpiä tuhonaiheuttajia olivat mäntyvaltaisissa metsiköissä surmakka-sieni, tervasroso sekä hirvi. Kuusivaltaisissa metsissä yleisimmin tuhoja aiheuttivat lahottajasienet. Kuusikoissa olivat aiheuttaneet vaurioita usein myös ilmastotekijät, kuten pakkanen ja tuuli, ja maaperätekijät sekä puunkorjuu.

Tuhonaiheuttajien yleisyyttä ja niiden muutoksia selvitettiin myös vuosittain 450 koealalla samoissa puissa vuosina 1986–88. Näissä puissa lisääntyi sienituhojen osuus,

Kuva 93. Eri tuhonaiheuttajien yleisyys pysyvillä koealoilla 1985–86.



Kuva 94. Tuhojen yleisyys vuotuisen elinvoimaseurannan koealojen (450 koealaa) puissa vuosina 1986–88. Sellaisten puiden osuus, joissa havaittiin jokin tuho, kasvoi tarkastelujakson aikana noin 13 %-yksikköä. Tulokset ovat suuntaa-antavia, sillä osa puista hakattiin jakson aikana ja hedekukinnasta aiheutunutta neulaskatoa ei huomioitu vuonna 1988.

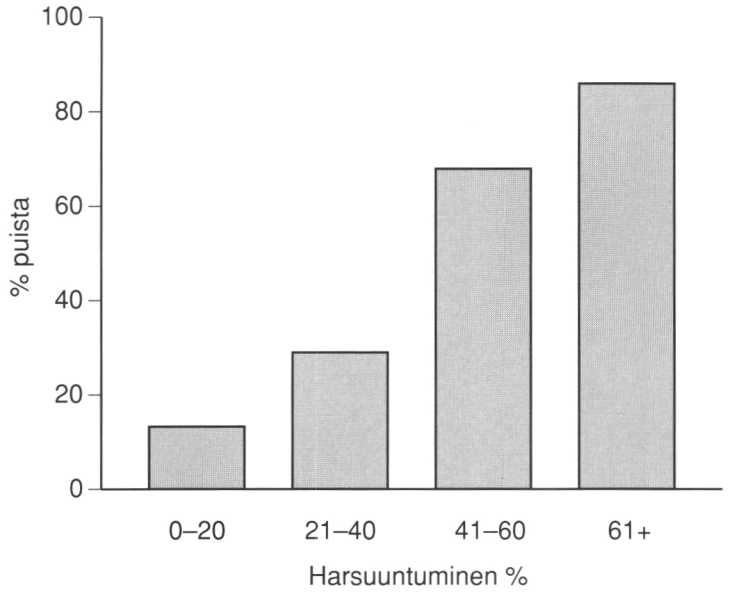


erityisesti männynversosurman ja kuusen neulasten värivikoja aiheuttavien sienten osuus (kuva 94).

Etelä-Suomen pysyvillä koealoilla tehtiin inventointia tarkempi selvitys erilaisten tuhonaiheuttajien esiintymisestä. Yleisimmin esiintyi sienituhoja, joita aiheuttivat erilaiset lahottajasienet tai surmakka; kumpikin aiheutti noin kolmasosan havaituista sienituhoista. Myös suopursuruoste, kuusen neulaskariste, tervasroso, juovakariste sekä kuusenruoste olivat melko yleisiä. Muiden taudinaiheuttajien osuudet jäivät hyvin pieniksi.

Yleisimpiä tuhohyönteisiä olivat ytimennävertäjät, joiden osuus oli puolet hyönteistuhoista, pihkakääriäinen, pienihavukirva ja muut kirvat, ruskomäntypistiäinen, punalatikka sekä pienikuusikääriäinen.

Abioottisista tekijöistä pakkanen aiheutti puolet havaituista vaurioista ja kasvupaikan kuivuus tai märkyys kolmanneksen. Myös lumi- ja tuulituhoja esiintyi koealoilla.



Kuva 95. Vähintään vaurioita jättävien tuhojen osuus eri harsuuntuneisuusluokissa VMI8:n pysyvien koealojen havupuissa. (Ks. harsuuntuneisuusluokat: *Latvustunnukset ja puun kasvu elinvoimaisuuden ilmentäjinä*, s. 77)

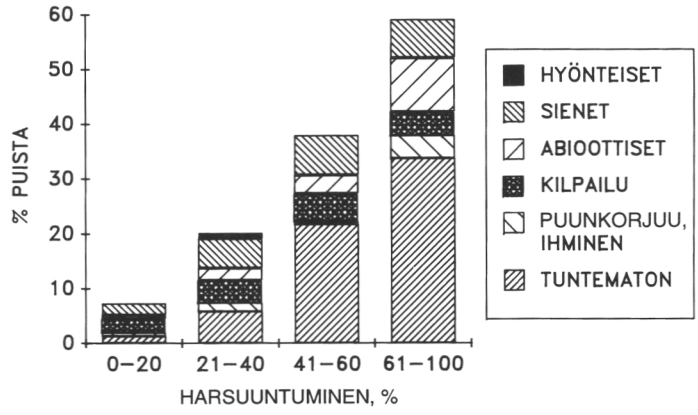
Tuhot ja harsuuntuneisuus

Kaikilta pysyviltä koealoilta saadut tulokset osoittavat, että harsuuntuneisuuden lisääntyessä lisääntyy myös tuhonalaisten puiden osuus. Noin 70 %:ssa yli 20 %:sesti harsuuntuneissa havupuissa oli jokin muu tuho, mutta yli 60 %:sesti harsuuntuneissa havupuissa tuhoja havaittiin jo 80–90 %:ssa.

Tärkeämpää on kuitenkin niiden tuhojen osuus, jotka jättävät puihin vaurioita tai voivat aiheuttaa puiden kuoleman. Näidenkin tuhojen osuus lisääntyy hyvin jyrkästi harsuuntuneisuuden kasvaessa. Alle 20 %:sesti harsuuntuneissa puissa noin joka kymmenennessä puussa oli tällainen vakava tuho, mutta yli 60 %:sesti harsuuntuneissa puissa vakava tuho tavattiin jo 60–90 %:ssa. Viimeksi mainitussa puujoukossa puun kuolemaan johtavia tuhoja oli puolet kaikista tuhoista (kuva 95).

Kun samoja puita seurattiin vuosina 1986–87 ja 1987–88 ns. ekstensiivitason koealoilla, todettiin tuhon asteen lisääntymisen puussa olevan selvästi yhteydessä harsuuntuneisuuden lisääntymiseen. Harsuuntuneiden puiden vakavista tuhoista oli valtaosa eli 88 % tuntemattomien tekijöiden aiheuttamia neulastuhoja, latvanvaihtoja ja runkovaurioita. Tuhonaiheuttajaryhmistä vain tuntemattomien tekijöiden aiheuttama tuhon asteen kasvu sekä latvuskilpailun (vuonna 1988) lisääntyminen olivat yhteydessä harsuuntuneisuuden lisääntymiseen.

Bioottisten tekijöiden osuus harsuuntumisen aiheuttajana on yleisesti ottaen vähäinen (kuva 96). Tunnettujen tuhojen välittömästi aiheuttamaa harsuuntuneisuuden lisääntymistä havaittiin koko eteläisen Suomen alueella noin 8 %:ssa tutkittuja havupuita, tällöin latvuskilpailua ei otettu huomioon. Sienet ja hyönteiset aiheuttivat harsuuntunei-



Kuva 96. Harsuuntumisen aiheuttajat eri harsuuntumisluokissa.

suuden välittömän lisääntymisen 2,6 %:ssa ja 2,4 %:ssa havupuita, ja abioottiset tekijät, kuten tuuli, lumi, ilmasto- ja maaperätekijät 2,2 %:ssa.

Männyllä tuulen ja versosurman vikuuttamissa puissa harsuuntuneisuus oli merkittävästi suurempaa kuin terveissä puissa. Kuusella harsuuntuneisuus oli vastaavasti suurempaa lahoissa puissa. Joitakin alueellisia eroja todettiin, esimerkiksi abioottisten tekijöiden, pääasiassa pakkasen, aiheuttamat vauriot lisäsivät harsuuntuneisuutta noin 4 %:ssa Etelä-Suomen metsälautakuntien alueilla havupuissa vuonna 1986. Versosurman pahiten vaivaamalla alueella, Lounais-Suomessa, Satakunnassa ja Pirkka-Hämeessä sekä Etelä-Karjalassa, lähinnä männiköissä tehdyissä selvityksissä havaittiin, että tauti oli lisännyt puiden harsuuntuneisuutta noin joka neljännessä puussa.

Tuhojen aiheuttamaa harsuuntumisen lisääntymistä ei voida suoraan osoittaa valtakunnallisen aineiston perusteella. Tätä tarkoitusta varten on verrattava samoissa ympäristöoloissa, myös samanlaisten laskeumien vaikutuksen alaisena kasvavia puita. Kun verrataan tietystä tuhosta kärsineiden puiden harsuuntuneisuutta samojen koealojen terveisiin eli ilman tuhomerkintää olleisiin puihin, saadaan eri vuosina varsin erilainen kuva harsuuntumiseen vaikuttaneista tuhoista.

Jos tarkastellaan alueellisesti tuhosta kärsineiden ja samoilla koealoilla kasvavien terveiden puiden harsuuntumiseroja, huomataan surmakan eli versosyövän lisänneen männyn harsuuntumista Länsi-Suomessa. Lisäksi selvästi alueellisina keskittyivät männyn neulastuhot vuosina 1985–86 ja männyn latvatuhot vuosina 1985–86 Lappiin ja Kainuuseen. Kuusen runkovauriot puolestaan lisäsivät harsuuntuneisuutta vuosina 1985–86 maan eteläosassa. Muut tuhot, esimerkiksi tervasroso (vuonna 1987) ja hyönteistuhot, lisäsivät puiden harsuuntumista yksittäisillä koealoilla maan eri osissa, mutta eivät alueellisesti lisänneet harsuuntuneisuutta.

Pysyvillä koealoilla korkeintaan 20 % kaikista harsuuntuneista havupuista kärsi sellaisista tuhoista, jotka vaikuttivat niiden elinvoimaan, mutta joiden ei voida katsoa yleistyvän ilman epäpuhtauksien vaikutuksesta. Tällaisiksi tuhoiksi katsottiin tuulen, lumen, latvuskilpailun, ihmisen, nisäkkäiden ja ruostesienien aiheuttamat tuhot.

Harsuuntuneisuuden todellisia syitä on usein vaikea osoittaa tausta-alueilla. Ilman epäpuhtaudet aiheuttavat melko hitaasti etenevän ja vaikeasti mitattavan muutoksen, sen sijaan äkilliset ja paikalliset muutokset metsien kunnossa voivat olla muiden tekijöiden, kuten esimerkiksi sieni-infektioiden tai säätekijöiden aiheuttamia.

Aiheesta enemmän

Jukola-Sulonen, E-L., Mikkola, K., Nevalainen, S. & Yli-Kojola, H. 1987. Havupuiden elinvoimaisuus Suomessa vuosina 1985–1986. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 256. 92 s.

Nevalainen, S. & Liukkonen, K.M.H. 1988. Ilman epäpuhtauksien vaikutus bioottisiin metsätuhoihin. Kirjallisuuskatsaus. Folia Forestalia 716. 25 s.

Männynversosurman yleisyys vuosina 1986–89

Surmakka-sienen aiheuttamaa männynversosurmaa havaittiin VMIn kertainventoinnin koealoilla 1986–89 lähes 10 %:ssa männiköistä. Pahimmat tuhot keskittyivät Lounais-Suomeen, Satakuntaan, Hämeeseen ja Etelä-Karjalaan, jossa tautia esiintyi eräillä paikkakunnilla yli puolessa tutkituista männiköistä. Tautia oli hyvin yleisesti myös Pohjois-Karjalan, Etelä-Savon ja Itä-Savon männiköissä.

Vuonna 1988 tarkastettiin Satakunnassa ja Pirkka-Hämeessä uudelleen sellaiset inventointilohkot, joilla tautia oli havaittu edellisenä vuonna. Tarkastuksessa tautia havaittiin 63 %:ssa männyistä, ja 6 %:ssa niin vakavana, että puiden toipumista pidettiin epävarmana. Noin puolet tapauksista oli kesällä 1988 ilmennyttä ns. uutta tartuntaa.

Männynversosurmaa oli Satakunnassa ja Pirkka-Hämeessä yleisemmin soilla (21 % soista) kuin kangasmetsissä (5 %). Tauti oli yleisin toisaalta rehevähköillä (ruohoisilla) ja toisaalta piensaraisilla tai puolukkaisilla soilla. Se yleistyi myös metsikön puuston tihentyessä, mutta esimerkiksi lämpösumma tai maaston korkeus merenpinnasta ei vaikuttanut selvästi taudin esiintymiseen. Versosyövän esiintymisen ja muiden kertakoealoilla arvioitujen tunnusten välille ei Satakunnassa ja Pirkka-Hämeessä havaittu riippuvuutta. Pysyvilläkään koealoilla ei esimerkiksi naavojen ja luppojen esiintyminen ollut yhteydessä versosurmaan.

Vuotuisen seurannan koealoilla sienitaudit yleistyivät vuosina 1986–88. Tutkituista puista 13,6 %:ssa oli männynversosurma vuonna 1988, mutta vain 0,8 %:ssa se haittasi puun kehitystä.

Versosyöpää tavattiin männyissä kesällä 1988 kaikkialla Etelä- ja Keski-Suomessa. Lapissa sitä esiintyi vain itärajan läheisyydessä. Länsi-Suomen pahimmilla epidemia-alueilla ruskea yleisväri leimasi kokonaisia metsiköitä ja taudin tappamia neulasia oli koko latvuksessa. Tauti laantui seuraavana kesänä 1989, mutta joitakin tuhokeskittymiä esiintyi vielä Itä-Suomessa.

6. Epifyytit ja aluskasvillisuus ilmansaasteindikaattoreina

6.1 Ilmansaasteet ja lajien yleisyys

Jäkälät, sammalet ja putkilokasvit ympäristön tilan kuvaajina

Ilmansaasteiden vaikutukset näkyvät usein metsäekosysteemin muissa osissa ennen kuin näkyviä oireita voidaan havaita puissa. Herkkiä kasvi-, sieni- ja eläinlajeja voidaan käyttää ns. bioindikaattoreina ilmaisemaan saastekuormitusta metsissä. Tietyn bioindikaattorilajin yleisyys, esiintyminen tai puuttuminen tai sen jonkin ominaisuuden kuten värin tai kemiallisen koostumuksen muutos kuvastaa myös ympäristötekijöiden muutosta.

Jotkut lajit väistyvät saastekuormituksen lisääntyessä. Jotkut taas hyötyvät saasteista niiden aiheuttaman ravinteiden, kuten typen, lisääntymisen takia. Jotkut lajit hyötyvät muiden lajien vähentyessään vapauttamasta elintilasta. Vauriot ja muutokset ilmaisinlajeissa lisääntyvät ilmansaasteiden lisääntyessä.

Jäkälät ja sammalet bioindikaattoreina

Useissa tutkimuksissa etenkin jäkälät on havaittu hyviksi ilmansaasteiden varhaisvaikutusten ilmentäjiksi. Usein ensimmäinen näkyvä merkki ilmansaastekuormituksen kasvamisesta on tiettyjen, puiden oksilla ja rungoilla kas-

vavien eli epifyyttisten jäkälälajien väheneminen ja lopulta katoaminen.

Jäkälät ja sammalet ovat rakenteeltaan yksinkertaisempia kuin putkilokasvit, eli siemenkasvit ja sanikkaiset. Niillä ei ole erikoistunutta juuristoa, vaan ne ottavat ravinteet ja veden suoraan pintasolukkonsa läpi. Näin myös laskeuman mukana tulevat epäpuhtaudet voivat joutua helpommin jäkälien ja sammalien aineenvaihduntaan. Lisäksi jäkälät pystyvät ottamaan tehokkaasti aineita laimeistakin pitoisuuksista. Haitalliset aineet kulkeutuvat jäkäliin helposti, koska jäkälien suojaava pintakerros on ohut tai se puuttuu kokonaan, eikä niillä ole kaasujen vaihtoa säätteleviä ilmarakoja.

Jäkälät ovat sienen ja levän symbioottisia yhdistymiä, ja näiden osien vuorovaikutus on ilmeisen herkkä häiriöille. Jäkälät kasvavat tehokkaasti keväisin ja syksyisin, jolloin myös ilmassa on eniten epäpuhtauksia. Maassa kasvavat jäkälät ovat lumipeitteen ansiosta paremmin suojassa kuin puiden rungoilla kasvavat epifyyttijäkälät. Partamaisesti kasvavat jäkälät, esimerkiksi naavat ja lupot, voivat siivilöidä kiinteitä saastehiukkasia myös suoraan ilmasta.

Herkkiä jäkälälajeja ovat mm. nahkajäkälät sekä palleroporonjäkälä. Kangastinajäkälä on puolestaan melko kestävä.

Sammalista nopeasti lisääntyvät, paljaan maan ensimmäiseksi valtaavat lajit, ns. pioneerilajit, kestävät hyvin ilmansaasteita. Tällaisia ovat mm. hopeahiirensammal, kulosammal, nuotiosammal sekä varstasammalet. Tavallisimpiin metsäsammaliimme kuuluvat seinäsammal ja kerrossammal ovat ilmansaasteille melko herkkiä, sillä niiden lisääntyminen häiriintyy saastuneessa ympäristössä. Ne voivat lisäksi kärsiä typpilaskeuman aiheuttamasta heinien ja ruohojen runsastumisesta.

Putkilokasvit

Metsäpuita ja joitain viljelykasveja lukuunottamatta ilmansaasteiden vaikutuksia putkilokasveihin on tutkittu hyvin vähän. Maaperän happamoituminen suosii luontaisestikin happamiin oloihin sopeutuneita lajeja, esimerkiksi metsälauhaa. Yleisesti ottaen heinäkasvit runsastuvat ruohojen kustannuksella saastumisen edetessä, ja esimerkiksi Keski-Euroopan vuoristoseutujen pahiten saastuneilla alueilla aluskasvillisuus onkin lähes pelkkää heinikkoa.

Typensuosijat ovat usein pioneerilajeja, joiden menestymisedellytyksiä typpilaskeuma parantaa, ja jotka yleistyvät myös metsämaan käsittelyn jälkeen. Tällainen laji on mm. vadelma.

Selkeimmät tulokset ilmansaasteiden vaikutuksista metsien aluskasvillisuuteen on saatu päästölähteiden läheltä. Esimerkiksi turkistarhojen lähistöllä heinät ovat yleistyneet (ks. *Typpilaskeuman vaikutukset turkistarhojen lähimetsissä,* s. 170). Myös metsävarpujen on havaittu



Kuva 97. Museonäytteet ovat ikkuna menneisyyteen. Helsingin yliopiston kasvimuseossa on runsaasti näytteitä puilla kasvavista jäkälistä jo 1850-luvulta alkaen. Vaikka jo v. 1934 ilmestyneessä tutkimuksessa havaittiin Helsingin keskustassa jäkälätön alue, "jäkäläautio", ovat vanhat pääkaupungin lähiseuduilta kerätyt naava- ja lupponäytteet hämmästyttävän suuria nykyisiin verrattuina. Naavoja ja luppoja kasvaa vieläkin pieninä yksilöinä eteläisenkin Suomen metsissä, ainoastaan kaupunkien keskustoista ne ovat lähes täysin hävinneet. Valokuva: Mikko Kuusinen.

kärsivän teollisuusympäristöissä. Kuolan tiedeakatemian tutkimuksissa metallisulattojen lähistöjen kasvillisuudesta on todettu variksenmarjan, sianpuolukan ja metsälauhan sietävän parhaiten ilmansaasteita.

Miten ilmansaasteiden vaikutuksia kasvillisuuteen tutkitaan?

Ilman epäpuhtauksien vaikutuksia voidaan tutkia selvittämällä jäkälien, sammalten tai putkilokasvien esiintymistä ja runsautta, tai niiden muutoksia pitkän ajan kuluessa saastelähteen ympäristössä tai valtakunnallisesti. Lajien yleisyyttä voidaan selvittää maastossa tehdyillä arvioinneilla tai tutkimalla puista maahan varisseen karikkeen jäkälälajistoa (ks. *Karikeaineistojen avulla selvitetään muutoksia herkkien jäkälien esiintymisessä,* s. 147). Kariketutkimuksilla samoin kuin mm. museonäytteiden avulla voidaan saada kuva pitkän ajan kuluessa tapahtuneista muutoksista (kuva 97).

Jäkäliä voidaan tutkia myös altistamalla niitä laboratoriossa eri aikoja eri saastemäärille tai siirtämällä niitä eri pituisiksi ajoiksi ja eri etäisyyksille päästölähteestä, jonka päästöt tunnetaan. Jäkälien avulla voidaan myös arvioida ilmansaastekuormitusta määrittämällä niissä olevien alkuaineiden määriä (ks. 6.2 *Sormipaisukarvejäkälän kemiallinen koostumus laskeuman kuvaajana,* s. 153).

Aiheesta enemmän

Kuusinen, M., Mikkola, K. & Jukola-Sulonen, E-L. 1990. Epiphytic lichens on conifers in the 1960's to 1980's in Finland. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 389–412.

Laaksovirta, K. 1984. Biologisten indikaattorien käyttö ilman saastumisen käytännön selvityksissä. Ympäristö ja terveys 2–3: 145–154.

Westman, L. 1986. Lavars indokatorvärde vid studier av luftförurenngar och skogsskador. Statens Naturvårdsverk. Rapport 3187. 52 s.

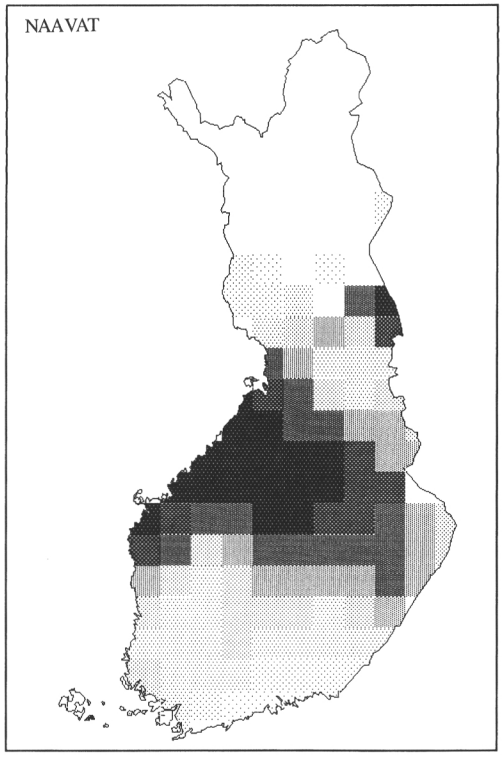
Epifyyttijäkälien esiintyminen

Valtakunnan metsien 8. inventoinnin yhteydessä tutkittiin puilla kasvavien jäkälien yleisyyttä. Tutkittaviksi otettiin 13 indikaattori- eli ilmaisinlajia, jotka ovat havupuilla yleisiä, helposti tunnistettavia ja luontaisesti laajalle levinneitä. Lajien herkkyys ilmansaasteille tunnetaan melko hyvin, joten ne on voitu ryhmitellä saasteita hyvin kestäviin, kohtalaisesti kestäviin, ja saasteille kohtalaisen herkkiin sekä hyvin herkkiin lajeihin (taulukko 12; bioindikaattoreista yleensä ks. *Jäkälät, sammalet ja putkilokasvit ympäristön tilan kuvaajina,* s. 139).

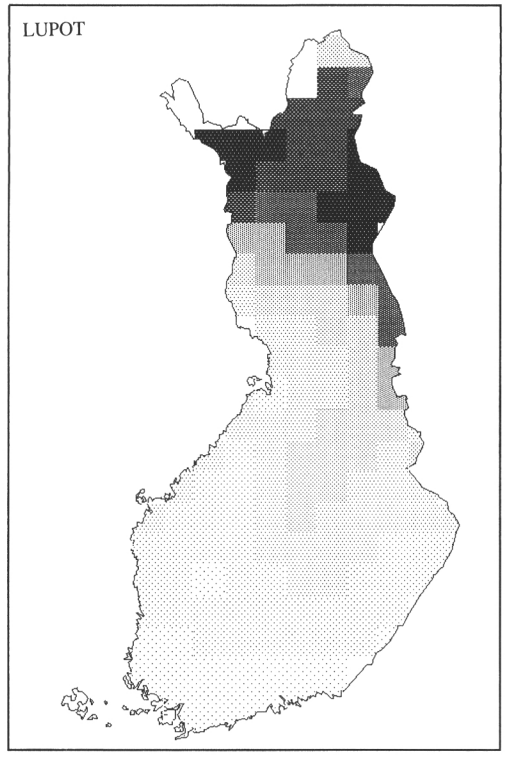
Jäkälien yleisyyttä selvitettiin metsien inventoinnin yhteydessä perustetuilla pysyvillä koealoilla (ks. tarkemmin liite 1) vuonna 1985 Etelä-Suomessa ja vuonna 1986 Pohjois-Suomessa. Koealoja, joilla kasvoi havupuita, osui otokseen kaikkiaan 2333, ja jäkälät inventoitiin kaikkiaan 6526 kuuselta ja männyltä. Jäkälien runsaus arvioitiin karkealla 0–3 runsausasteikolla puiden rungoilta ja oksilta 0,5–2,0 m korkeudelta, poronhoitoalueella tarkistettiin jäkälät myös korkeammalta.

Naavat ja lupot ovat väistyneet Etelä-Suomesta

Kuvissa 98 ja 99 on esitetty herkkien jäkäläsukujen, naavojen ja luppojen yleisyys Suomessa vuosina 1985–86. Naavoja on eniten Keski-Pohjanmaalla ja hyvin vähän Etelä-Suomessa, niiden luontainen levinneisyys ei ulotu Lappiin asti vaan painottuu maan keskiosiin. Luppoja sen sijaan on eniten Lapissa ja niiden määrä vähenee etelään päin. Inarin Lapin itäosissa on myös niukkaluppoinen alue. Naavojen ja luppojen niukkuus Etelä-Suomessa ei selity metsien rakenteen ja iän eroilla pohjoisempiin alueisiin nähden, vaan se johtuu mitä ilmeisimmin ilman epäpuhtauksista. Vielä 1950-luvun puolivälissä naavoja ja luppoja esiintyi yleisesti koko maassa.



Kuva 98. Naavojen levinneisyys ja keskimääräinen runsaus tutkittujen puiden rungoilla ja oksilla 50 x 50 km:n ruudukolla. Naavojen runsaus arvioitiin maastossa 0–3 asteikolla. Valkoisilta alueilta ne puuttuvat. Tummilla alueilla naavat esiintyvät runsaina, vaaleilla niukasti.



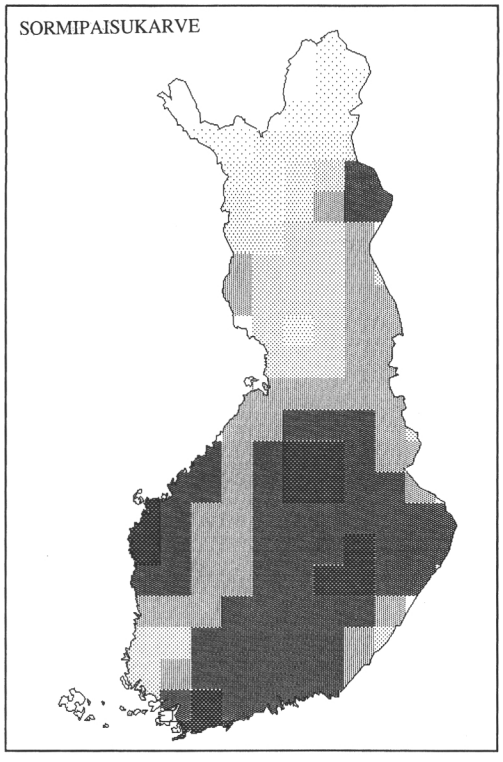
Kuva 99. Luppojen levinneisyys ja keskimääräinen runsaus. Selitykset samat kuin kuvassa 98.

Taulukko 12. Tutkimuksissa kartoitettujen jäkälälajien saasteenkestävyys.

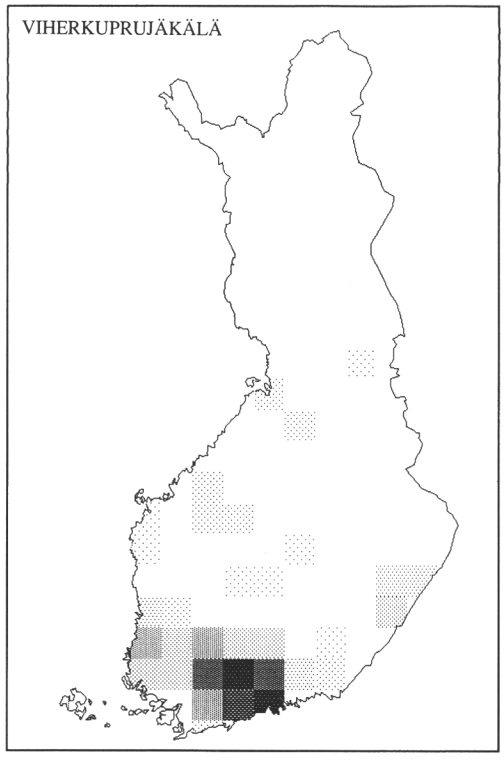
Kestäviä:	viherkuprujäkälä ja seinäsuomujäkälä
Melko kestäviä:	sormipaisukarve, keltatyvikarve, ruskoröyhelö, keltaröyhelö
Melko herkkiä:	tyvikarpeet, harmaaröyhelö, harmaahankakarve, raidanisokarve, valkohankajäkälä,
Herkkiä:	lupot, naavat

Sormipaisukarve

Sormipaisukarve on maamme yleisin havupuilla kasvava jäkälälaji, jota on runsaimmin Keski-Suomessa (kuva 100). Laji kestää ilmansaasteita kohtalaisen hyvin, mutta se puuttuu kuitenkin vahvimmin kuormitetuilta alueilta, kuten kaupunkien keskustoista. Joidenkin silmävaraisten havaintojen mukaan sormipaisukarve on erityisesti Keski-Suomessa viime vuosina runsastunut peittäen kuusten oksia vahvana harmaana mattona.



Kuva 100. Sormipaisukarveen levinneisyys ja keskimääräinen runsaus. Selitykset samat kuin kuvassa 98.



Kuva 101. Viherkuprujäkälän ja viherlevän levinneisyys ja keskimääräinen runsaus. Selitykset samat kuin kuvassa 98.

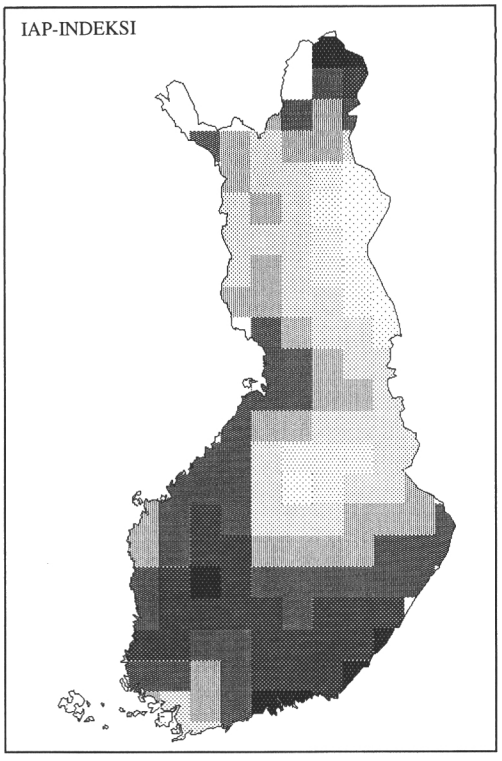
Viherkuprujäkälä ja viherlevä

Kaupunkien puistopuiden rungoilla usein tavattava vihreä, rupimainen peite on yleensä viherkuprujäkälää ja/tai viherlevää. Tässä ryhmässä lajin tarkka määritys on vaikeaa, sillä levän ja jäkälän ero on usein epäselvä. Valtakunnan metsien inventoinnissa käytetty ekologisen lajikokonaisuuden (jäkälä + levä) määritys on kuitenkin riittävän tarkka ilman epäpuhtauksien vaikutusten tutkimiseen.

Viherkuprujäkälän ja viherlevän levinneisyyden painopiste on selvästi lounaisimmassa Suomessa (kuva 101). Lajit ovat toisaalta luontaiselta levinneisyydeltään eteläisiä, mutta ne yleistyvät myös ilman epäpuhtauksien takia, erityisesti typpikuormituksen lisääntyessä (ks. *Leväpeite kuusen neulasilla merkki typpikuormasta*, s. 148).

Ilmaisinlajistosta johdettu IAP-indeksi

Ilmaisinlajikartoituksen kaikkien tietojen tiivistämiseksi mahdollisimman yksinkertaiseen muotoon käytettiin tu-



Kuva 102. Ilman laatu Suomessa jäkälälajien perusteella arvioituna. 13 epifyyttijäkälälajin esiintymisen perusteella on laskettu IAP-indeksin *(Index of Atmospheric Purity)* alueellisuus 50 x 50 km:n ruudukolla. Mitä tummempi ruutu, sitä vähemmän on jäkälälajeja ja erityisesti herkkiä lajeja; kestäviä lajeja on taas enemmän. Mitä vaaleampi alue sitä enemmän myös herkkiä jäkäliä ja sitä puhtaampi ilma.

losten analysointiin Kanadassa kehitettyä ilmanpuhtausindeksiä eli ns. IAP-indeksiä *(Index of Atmospheric Purity)*. Se kuvastaa jäkälälajien määrää ja laatua ja siten lajiston monimuotoisuutta. Ilman ollessa puhdasta jäkäliä kasvaa usein paljon ja lajeja on useita, tällöin myös IAP-indeksi on korkeampi kuin vähälajisessa ympäristössä.

Kuvassa 102 on esitetty valtakunnan metsien 8. inventoinnin (VMI) pysyvien koealojen (3009 koealaa) aineistosta laskettujen IAP-indeksien alueellisuus. Jakauma noudattaa kohtalaisen selvästi tunnetuista päästölähteistä laskettujen rikkilaskeumamallien alueellisuutta. Alhaisimmat indeksin arvot (tummat alueet) ovat Etelä- ja erityisesti Kaakkois-Suomessa, mutta myös Oulun seudulla sekä Inarin itäosissa, joissa jäkälälajisto on sangen köyhä.

Itä-Lappi

Kuolan niemimaan suurten teollisuuskeskusten, Nikelin ja Montsegorskin sekä Apatitin kaivosalueiden suuret rikki- ja raskasmetallipäästöt tulivat ilmi vasta vuonna 1987. Lapin koealaverkko perustettiin jo vuonna 1986 huomattavasti Etelä- ja Keski-Suomea harvemmaksi, koska Lapin oletettiin edustavan puhdasta tausta-aluetta. Siten erityisesti koealojen vähyys on vaikeuttanut Itä-Lapin tutkimusta ja yksityiskohtaisten johtopäätösten tekoa.

Itäisessä Inarissa, josta Nikelin kaivoskombinaatin teollisuusaavikoille on matkaa vain 30–50 km, on muutamia koealoja, joilla IAP-indeksit ovat alhaisia ja joilta herkät lajit puuttuvat. Länsi-Lapissa yhtä selvää lajiston köyhtymistä ei ole havaittavissa. Sen sijaan Itä-Lapissa, Sallan ja Savukosken itäosissa ei jäkälälajistossa näy muiden kuormitettujen alueiden kaltaista lajien vähenemistä, vaan luppoja on ollut itäisimmilläkin koealoilla kohtalaisen paljon. Runsasluppoinen alue ulottuu myös itärajan takana noin 70 km etäisyydelle Montsegorskin teollisuusalueesta.

Tähän mennessä saatujen tulosten perusteella on vaikea arvioida jäkälälajiston aikaisempaa koostumusta Itä-Lapin kuusikoissa. Lisäksi mm. epäpuhtauksien kemialliset ominaisuudet vaikuttavat niiden haitallisuuteen, esimerkiksi kaasumainen rikkidioksidi vaikuttaa eliöihin eri tavoin kuin sadeveden kanssa reagoinut rikki. Pohjoisessa sadesummasta kertyy suuri osa lumena, ja pakkasilla jäkälien aineenvaihdunta on tietenkin pysähdyksissä. Eteläisessä taas sadevesi vaikuttaa jäkäliin huomattavasti pitemmän ajan vuodesta.

Vuonna 1989 aloitettiin laaja, useiden korkeakoulujen ja tutkimuslaitosten yhteistyönä toteutettava Itä-Lapin metsävauriotutkimus. Tässä hankkeessa selvitetään myös porolaidunnuksen vaikutuksia puuston kasvuun ja terveydentilaan. Maanpinnan jäkäläpeitteen ohenemisen, ja paikoin täydellisen katoamisen, on epäilty liittyvän karujen männiköiden harsuuntumiseen.

Aiheesta enemmän

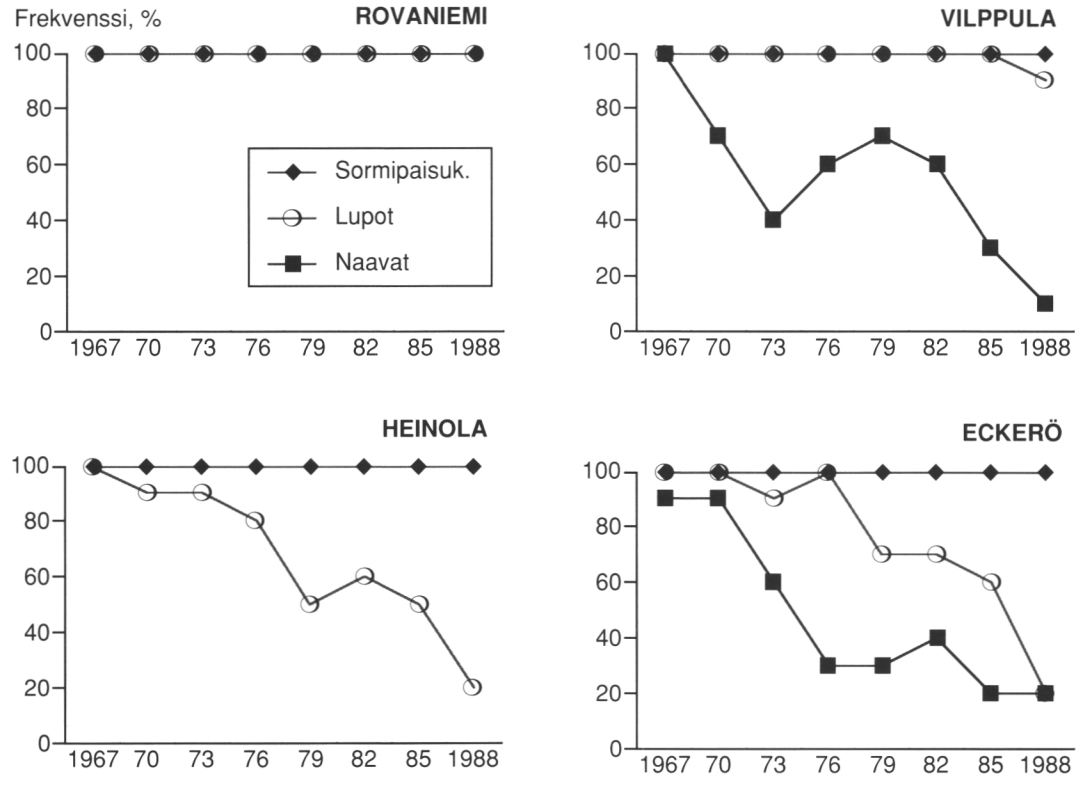
Jussila, I., Laihonen, P. & Jormalainen, V. 1991. Turun seudun ilman laadun seuranta bioindikaattorien avulla vuonna 1990. SYKE Sarja B3. Turun yliopisto. Satakunnan ympäristötutkimuskeskus. 61 s.

Kuusinen, M. 1991. Havupuiden valtakunnallinen jäkäläkartoitus. Luonnon Tutkija 95: 26–30.

Kuusinen, M., Mikkola, K. & Jukola-Sulonen, E-L. 1990. Epiphytic lichens on conifers in the 1960's to 1980's in Finland. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 389–412.

Metsät. Metsävarat ja metsien elinvoimaisuus. Ympäristökatsaus 9. 1990. Ympäristötietokeskus, 11 s.

Westman, L. 1986. Lavars indikatorvärde vid studier av luftföroreningar och skogsskador. Naturvårdsverket. Rapport 3187. 52 s.



Kuva 103. Naavojen, luppojen ja sormipaisukarvejäkälän esiintyminen neljän koealan karikenäytteissä vuosina 1967–88.

Karikeaineistojen avulla selvitetään muutoksia herkkien jäkälien esiintymisessä

Metsäpuiden karikesatoa on tutkittu pysyvillä koealoilla 1920-luvulta alkaen. Karike on puista maahan varisevia kasvinosia. Ensimmäiset koealat perustettiin vuonna 1925 metsäpuiden kukinnan ja siemensadon selvittelyä varten. Karikekeruuta jatkettiin ja laajennettiin 1950-luvulla, enimmillään koealoja oli 150 eri puolilla Suomea. Tuolloin otettiin käyttöön vielä nykyisinkin jatkuva keruumenetelmä, jossa 0,25–1 hehtaarin koealoille on sijoitettu 6–15 metallisuppiloa kankaisine keräyspusseineen (Ks. *Säät vaikuttavat männyn neulasten varisemiseen,* s. 96). Karikesadon seuranta lopetettiin useimmilla koealoilla 1970-luvun alkupuolella, mutta seurantaan jätettiin vielä parikymmentä koealaa.

Vuosikymmenten aikana kertynyt karikeaineisto on pääosin tallessa ja muodostaa näyteaineiston, jonka avulla voidaan tutkia mm. pitkäaikaista lajien runsauden vaihtelua tai neulasten alkuainekoostumuksen muutoksia. Erityisesti ilmansaasteille herkkien jäkälien yleisyydestä saadaan sen avulla arvokasta tietoa.

Kuvassa 103 on esitetty neljän eri puolilla Suomea sijaitsevan koealan karikenäytteistä tutkittu lajien ja laji-

ryhmien esiintymisen muutos. Suhteellisen saasteenkestävän sormipaisukarvejäkälän esiintyminen ei ole muuttunut, mutta ilmansaasteille herkät lupot ja naavat ovat selvästi vähentyneet eteläisimmässä Suomessa. Aineisto ei kuitenkaan kerro suoraan keräimiin pudonneiden jäkälien määrää (biomassaa) vaan ainoastaan sen, kuinka monesta koealan suppilosta lajia on löytynyt.

Herkkien lajien väheneminen osoittaa ilman epäpuhtauksien jo selvästi vaikuttaneen metsäluontoon Etelä-Suomessa, mutta Länsi- ja Keski-Lapissa ei ole vielä havaittavissa näin voimakkaita muutoksia. Koealojen puuston harveneminen ja ympäröivien metsien nuorentuminen ovat osaltaan vähentäneet luppoja ja naavoja, mutta ne eivät selitä havaittua jäkäläkatoa kokonaan.

Aiheesta enemmän

Kuusinen, M., Mikkola, K. & Jukola-Sulonen, E-L. 1990. Epiphytic lichens on conifers in the 1960's to 1980's in Finland. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 389–412.

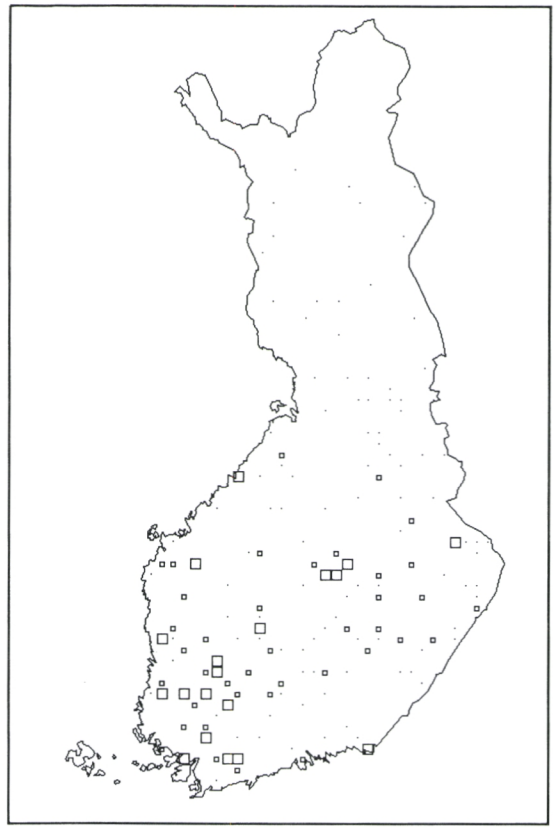
Metsät. Metsävarat ja metsien elinvoimaisuus. Ympäristökatsaus 9. 1990. Ympäristötietokeskus, 11 s.

Leväpeite kuusen neulasilla merkki typpikuormasta

Levät ovat alkeellisimpia kasveja, joita elää kaikenlaisissa vesissä valtameristä vesilammikoihin, mutta on myös kivillä ja puiden rungoilla kasvavia lajeja, jotka suosivat varjoisia, pienilmastoltaan kosteita kasvupaikkoja. Leväpeitettä esiintyy puilla erityisesti voimakkaiden typpilähteiden, kuten karjasuojien ja lannoitetehtaiden lähistöllä sekä peltojen reunametsissä merkkinä runsaasta typpilaskeumasta.

Puilla havaitut levät kuuluvat pääosin viherleviin. Usein levät kasvavat vain rungoilla ja oksilla, mutta joskus ne leviävät oksilta neulasten pinnalle verhoten ne oliivinvihreään peitteeseen (kuva 105). Levien oletetaan häiritsevän neulasten keskeisiä elintoimintoja ja aiheuttavan näin soluvaurioita.

Etelä-Skandinaviassa ja paikoin Keski-Euroopassa leväkasvustojen on havaittu yleistyneen neulasten pinnalla jo useiden vuosien ajan. Suomessa niitä esiintyy runsaasti puiden rungoilla lähinnä Lounais-Suomessa ja erityisesti taajamissa ja turkistarhojen ympärillä. Viime vuosina tutkijat ovat havainneet eteläisellä rannikkoalueella leväpeitettä myös neulasilla.



Kuva 104. Leväpeitteen esiintyminen kuusen neulasilla. Pieni neliö kuvaa niukkaa ja suuri runsasta leväpeitettä. Havaintopisteitä oli yhteensä 165.

Levien esiintymistä neulasilla selvitettiin vuonna 1989. Niitä esiintyi suurimman typpikuorman alueella Etelä-Suomessa yleisesti (kuva 104). Leväpeitettä tavattiin täysikasvuisten puiden alaoksilta ja alikasvospuiden koko latvuksesta. Levää kasvaa runsaimmin vanhoilla neulasilla, eikä sitä yleensä esiinny nuorimmilla neulasilla.

Levää tavattiin yleensä vain yksittäisillä puilla. Tästä päätellen typpikuorman lisäksi myös muut tekijät, kuten puiden vastustuskyvyn ja ravinnetilan heikkeneminen, neulasia suojaavan vahapeitteen kuluminen ja vaurioituneista neulasista huuhtoutuvat ravinteet, voivat edistää levien kasvua. Viime vuosien leudot talvet ja lämpimät kesät lienevät myös suosineet levien kasvua.

Aiheesta enemmän

Göransson, A. 1990. Alger, lavar och barruppsättning hos unggranar. Längs en kvävegradient från Sverige till Holland — en pilotstudie. Naturvårdsverket. Rapport 3741. 37 s.



Kuva 105. Leväpeitettä kuusen neulasilla. Nykyään metsässä kulkija voi havaita leväkerroksen peittävän neulasia varsinkin Etelä-Suomessa. Valokuva: Erkki Oksanen.

Neulasten pintamikrobit ja ilmansaasteet

Useat mikrobit kasvavat ja lisääntyvät kasvien pinnalla isäntäkasvin solukkoihin tunkeutumatta, jolloin niitä kutsutaan epifyyttisiksi mikrobeiksi. Endofyyttiset mikrobit puolestaan elävät kasvin sisällä tautia aiheuttamatta ja lisääntyvät kasvinosan heikentyessä tai kuollessa.

Raja epifyyttisten ja endofyyttisten ja toisaalta patogeenisten eli tautia aiheuttavien mikrobien välillä on liukuva — saman suvun eri lajit saattavat käyttäytyä eri tavoin ja samakin laji voi muuttua aggressiivisemmaksi esimerkiksi isäntäkasvin kunnon heikentyessä. Toiset tutkijat pitävät vain tiettyjä hiivoja ”oikeina” epifyytteinä, koska esimerkiksi yleiset *Cladosporium*- ja *Aureobasidium*-sienilajit voivat asuttaa kasvien lehtiin syntyneitä vaurioita ja mm. ilmarakouurteita.

Tuusulassa kesällä 1987 tehtyjen tutkimusten mukaan yleisimmät epifyyttiset lajit kuusen neulasilla olivat *Cladosporium*-sukuun kuuluvat sienet sekä *Aureobasidium pullulans*-sieni. Elokuussa otetuissa näytteissä näitä lajeja oli huomattavasti runsaammin kuin kesäkuun näytteissä. Yli 60 % elokuussa eristetyistä sienistä tai hiivoista kuului *Aureobasidium*-sukuun ja lähes 30 % *Cladosporium*-sukuun. Muita sieniä, mm. *Penicillium*, *Sclerophoma* ja *Sirococcus*, oli kesäkuussa 13 % (elokuun näytteissä enää 3 %), ja mm. *Rhotorula*- ja *Cryptococcus*-suvun hiivoja oli 2–4 %.

Sieniä oli nuorimmissa neulasissa yleensä enemmän

kuin vanhoissa. Ainoastaan *Aureobasidium*-lajeja oli hieman runsaammin vanhemmissa neulasvuosikerroissa, mikä saattaa viitata siihen, että ne käyttävät ravinnokseen kuolleita kasvinosia, ja ovat ns. saprofyyttejä. Eri puuyksilöissä sienien ja hiivojen määrät vaihtelivat kuitenkin paljon, sen sijaan yksittäisen puun eri osissa sieni- ja hiivamäärät olivat yhtä suuria.

Osa pintamikrobeista torjuu tauteja

Epifyyttiset ja endofyytit sienet ja hiivat voivat torjua taudinaiheuttajia ja tuholaisia, koska ne tuottavat antibiootteja ja solumyrkkyjä. Ainakin ruohovartisilla kasveilla näiden on todettu vaikuttavan selvästi tuhonaiheuttajien esiintymiseen. Toisaalta mm. tietyt hiivalajit ja *Cladosporium*-suvun lajit voivat hajottaa neulasten vahakerroksen alla olevaa kutiinia, mutta niiden vaikutuksesta itse pintavahakerrokseen ei tiedetä paljoa. Joidenkin hiivojen on arveltu kykenevän hajottamaan myös vahakerrosta.

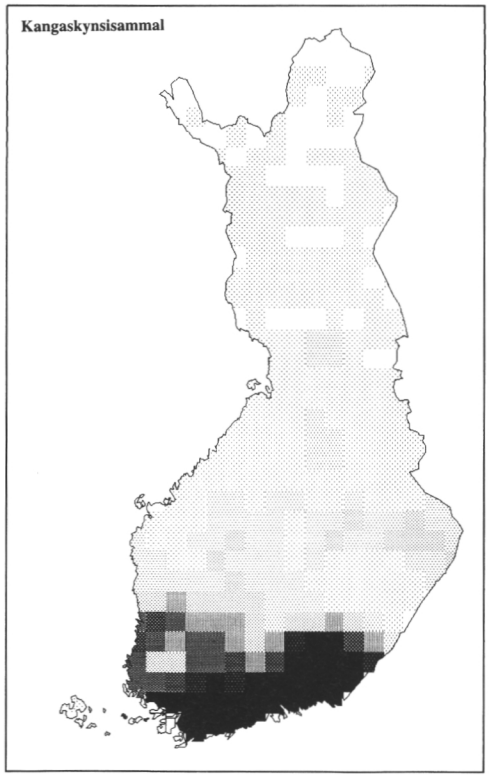
Ilmansaasteet muuttavat mikrobilajistoa

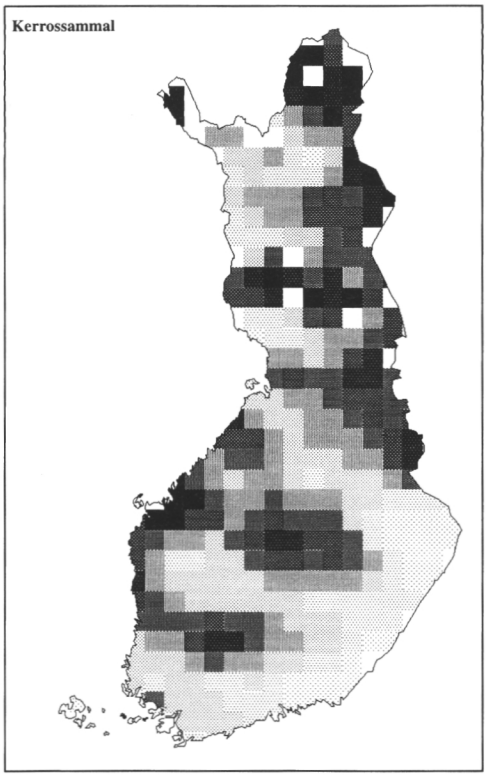
Puiden pinnalla elävien hiivojen (mm. *Sporobolomyces roseus*, *Cryptococcus* sp.) on todettu vähentyneen rikkidioksidikäsittelyjen jälkeen, ja niitä onkin todettu esiintyvän kaupunkialueilla vähemmän kuin maaseudulla. Hiivoja on jopa ehdotettu lyhytaikaisten epäpuhtauspitoisuuksien osoittajiksi. Toisaalta lipolyyttisiä hiivoja ja bakteereita on havaittu kuusenneulasissa runsaasti alueella, jossa rikkidioksidilaskeuma on suuri. Mm. metallipölyn ja neulasista huuhtoutuvien ravinteiden on todettu hieman lisänneen *Aureobasidium pullulans*-lajia, joka onkin ollut yleinen kaupunkialueilla. Se sietää myös suurta happamuutta kasvatusalustassaan.

Ilmansaasteiden vaikutuksesta neulasten pinnalla kasvava mikrobilajisto muuttuu herkimpien lajien väistyessä. Toistaiseksi havupuiden epi- ja endofyyttisistä mikrobeista ja niiden merkityksestä sekä ilmansaasteiden vaikutuksesta niihin tiedetään kuitenkin sangen vähän.

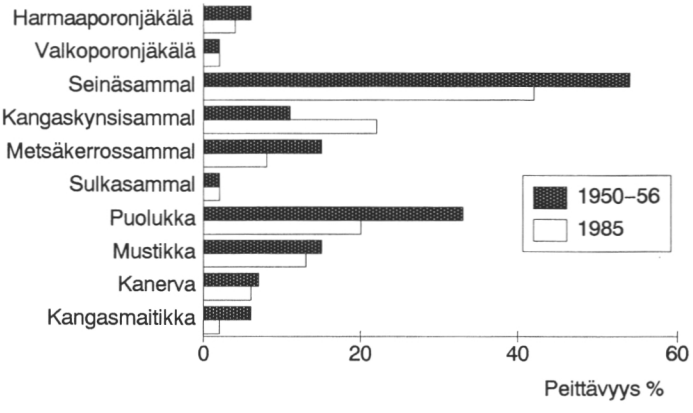
Aluskasvillisuuden muutokset

Kangaskynsisammalen on arveltu yleistyneen ja kerrossammalen vähentyneen Etelä- ja Kaakkois-Suomessa ilmansaasteiden takia. Kangaskynsisammalta on selvästi eniten teollistuneessa ja taajaan asutussa eteläisimmässä Suomessa (kuva 106).





Kuva 106. Kangaskynsisammalen ja kerrossammalen yleisyys valtakunnan metsien 8. inventoinnin mukaan. Kartassa tummilla alueilla laji esiintyy runsaana, vaaleilla niukasti.



Kuva 107. Aluskasvillisuuden yleisimpien lajien peittävyydet Etelä-Suomessa varttuneiden männiköiden pysyvillä koealoilla 1950–56 sekä 1985 (Lähde & Nieppola 1986).

Vuosina 1950–56 perustettiin vanhoihin männiköihin Etelä-Suomeen pysyviä kasvillisuuskoealoja, joilta kasvillisuusselvitykset ja puustomittaukset toistettiin vuosina 1983–85.

Tulosten mukaan jäkälät olivat vähentyneet 1950-lukuun verrattuna, ja eniten oli vähentynyt harmaaporojäkälä. Seinäsammal ja kerrossammal olivat myös vähentyneet, mutta kangaskynsisammal oli yleistynyt. Varvuista puolukka oli selvästi vähentynyt, mutta ruohojen ja heinien yleisyyksissä ei sen sijaan havaittu muutoksia (kuva 107).

Kujala, V. 1964. Metsä- ja suokasvilajien levinneisyys- ja yleisyyssuhteista Suomessa. Commun. Inst. For. Fenn. 59.1. 137 s.
Lähde, E. & Nieppola, J. 1986. Metsäkasvillisuuden muutoksista Etelä-Suomen vanhoissa männiköissä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 220. 21 s.

6.2 Sormipaisukarvejäkälän kemiallinen koostumus laskeuman kuvaajana

Jäkälät on monissa laajoissa selvityksissä todettu herkiksi ilman saastuneisuuden osoittajiksi. Tässä tutkimuksessa kerättäväksi jäkälälajiksi valittiin sormipaisukarve, joka on puiden rungoilla ja oksilla kasvava epifyyttijäkälä. Se elää ilman kosteuden varassa ja saa ravinteensa sadevedestä tai suoraan ilman kaasumaisista yhdisteistä, ja ravinteiden ohella se kerää myös muita ilman epäpuhtauksia, esimerkiksi raskasmetalleja.

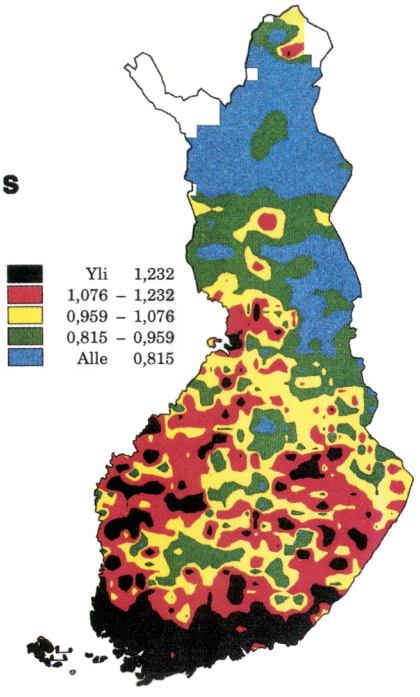
Tutkimuksessa selvitettiin, vaihtelevatko jäkälän alkuainepitoisuudet alueellisesti ja onko mahdollinen vaihtelu samansuuntaista päästöjen perusteella laadittujen laskeumaa esittävien mallien tulosten kanssa. Laajalle levinneenä ja ilmansaasteita kestävänä sormipaisukarve on tähän tarkoitukseen käyttökelpoinen jäkälälaji.

Tutkimuksessa kerättiin ILME-projektin yhteydessä perustetuilta pysyviltä koealoilta (ks. liite 1) yhteensä 2385 jäkälänäytettä, joista mitattiin 16 alkuaineen pitoisuudet (ks. alkuainemäärityksistä tarkemmin liitteestä 2). Tässä yhteydessä esitetään vain kahdeksan keskeisen alkuaineen alueellista vaihtelua kuvaavat kartat.

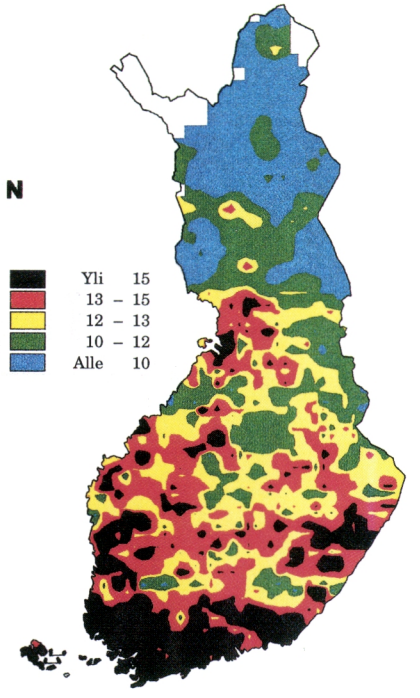
Tärkeimpien alkuaineiden määrät jäkälissä

Rikkiä ja typpeä kasvit tarvitsevat paljon, sillä ne ovat tärkeitä valkuaisaineiden ja entsyymien rakenneosia. Happaman sateen muodostumisessa kummallakin aineella on samankaltainen vaikutus, koska niiden oksideista muodostuu happamuutta lisääviä kemiallisia yhdisteitä.

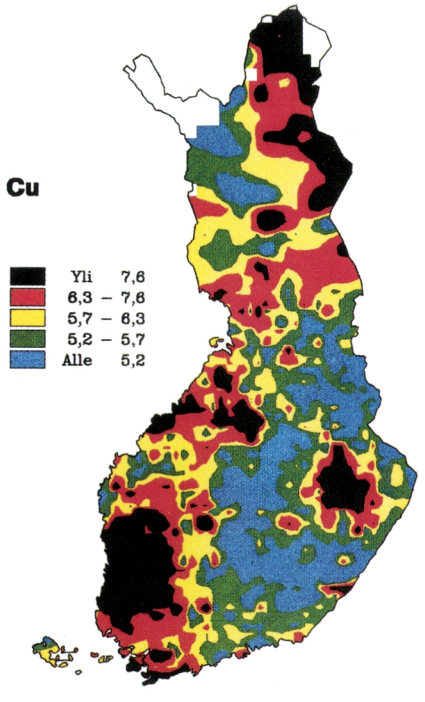
Sormipaisukarvejäkälässä oli rikkiä koko maassa keskimäärin 1,09 mg/g (vaihtelu 0,60–2,61 mg/g). Rikkiä oli jäkälänäytteissä eniten laajalla alueella eteläisimmässä Suomessa. Myös sisämaassa oli paikallisesti suurten pitoisuuksien alueita, ja Etelä-Suomen kanssa tasavertaisia alueita löytyi aina Perämeren rannikon tuntumasta Oulun pohjoispuolelta. Pohjois-Suomessa ja erityisesti Lapissa rikkiä oli jäkälissä vähän lukuunottamatta Inarin Lapin pohjoisosia (kuva 108).



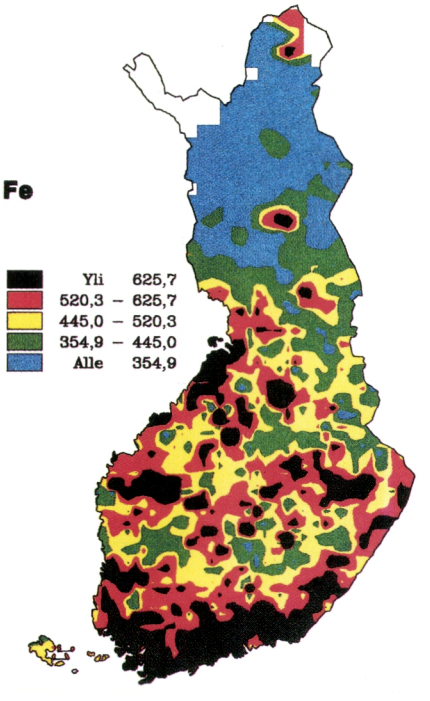
Kuva 108. Sormipaisukarvejäkälän rikkipitoisuus (mg/g kuiva-ainetta) vuosina 1985–86. Valkeat alueet johtuvat näytteiden puuttumisesta. Ks. tarkempi selostus tekstistä.



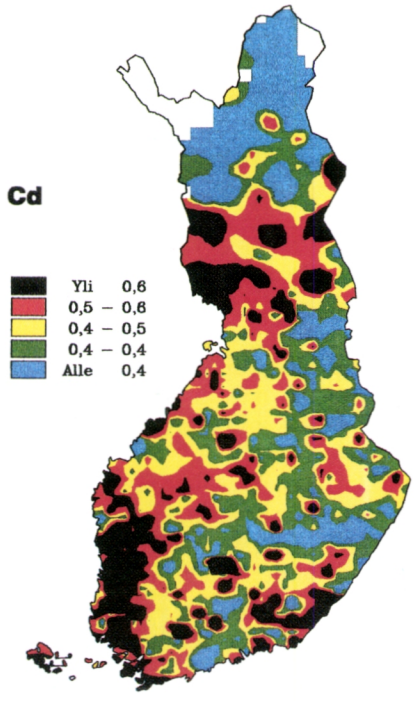
Kuva 109. Sormipaisukarvejäkälän typpipitoisuus (mg/g kuiva-ainetta).



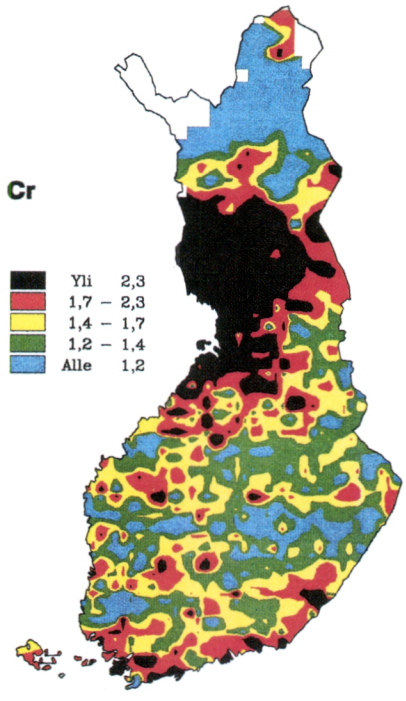
Kuva 110. Sormipaisukarvejäkälän kuparipitoisuus (µg/g kuiva-ainetta).



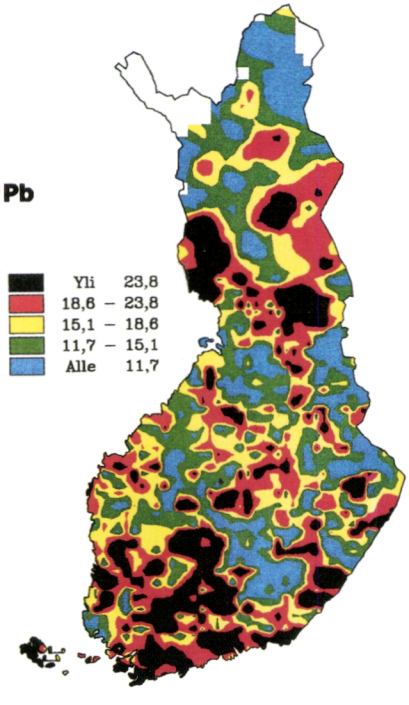
Kuva 111. Sormipaisukarvejäkälän rautapitoisuus (µg/g kuiva-ainetta).



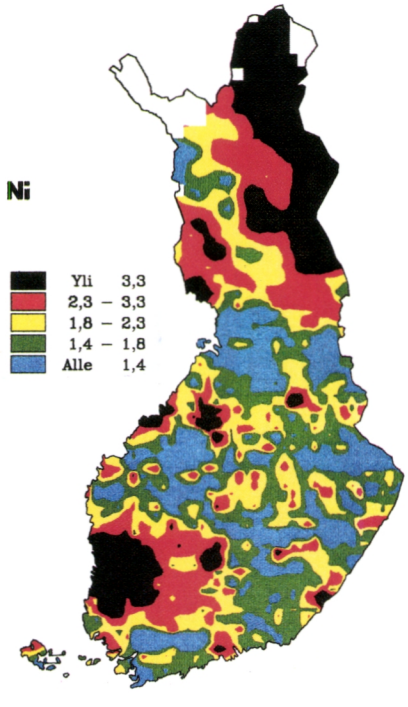
Kuva 112. Sormipaisukarvejäkälän kadmiumpitoisuus (µg/g kuiva-ainetta).



Kuva 113. Sormipaisukarvejäkälän kromipitoisuus (µg/g kuiva-ainetta).



Kuva 114. Sormipaisukarvejäkälän lyijypitoisuus (µg/g kuiva-ainetta).



Kuva 115. Sormipaisukarvejäkälän nikkelipitoisuus (µg/g kuiva-ainetta).

Typpeä jäkälissä oli keskimäärin 13,0 mg/g (vaihtelu 7,5–25,6 mg/g). Eniten sitä tavattiin pääpiirtein samoilla alueilla kuin rikkiäkin (kuva 109).

Kupari ja rauta ovat tärkeitä mikroravinteita, joita kasvit tarvitsevat suhteellisen pieniä määriä aineenvaihdunnassaan. Jos niiden saatavuus on heikko, ilmenee kasveissa erilaisia puutosoireita. Toisaalta esimerkiksi suuret kuparimäärät voivat olla haitallisia kasveille.

Jäkälissä oli koko maassa kuparia keskimäärin 7,3 µg/g (vaihtelu 3,5–199,6 µg/g) jäkälää. Selvästi eniten kuparia oli Satakunnassa, Keski-Pohjanmaalla, Pohjois-Karjalan ja Pohjois-Savon rajalla sekä Itä-Lapissa. Etelä-Suomessa on mainituilla alueilla kaivostoimintaa tai kuparia jalostavaa teollisuutta. Lapin suuret pitoisuudet puolestaan johtuvat mitä ilmeisemmin Venäjän puolelta tulevasta laskeumasta (kuva 110).

Rautaa oli jäkälissä koko maassa keskimäärin 544 µg/g (vaihtelu 180–3759 µg/g). Suurimmat rautapitoisuudet keskittyvät selvästi Etelä-Suomeen. Perämeren rannikon tuntumassa oleva laaja suurten pitoisuuksien alue on paikallisesti yhdistettävissä rautatehtaaseen (kuva 111).

Kadmium on haitallinen aine sekä ihmisille, eläimille että kasveille. Kasveissa haitallisuus johtuu sen kyvystä syrjäyttää sinkki entsymaattisissa reaktioissa. Kasvimassan kadmiumpitoisuus on normaalisti 0,1–1,0 µg/g kuiva-ainetta. Tämän tutkimuksen jäkälänäytteissä kadmiumia oli keskimäärin 0,7 µg/g (vaihtelu 0,12–4,25 µg/g).

Suurten kadmiumpitoisuuksien suhteellisen laaja alue läntisessä Suomessa on yhtenevä kuparin suurten pitoisuuksien kanssa. Perämeren pohjoisimman rannikon tuntumassa on toinen laaja alue. Suurimpia pitoisuuksia on mitattu myös Lapissa alueella, jonka kohdalla Venäjän puolella on huomattavaa kaivosteollisuutta. Kuparin ja kadmiumin suurten pitoisuuksien alueellinen vastaavuus saattaa osoittaa, että myös kadmiumia tulee jäkäliin laskeumasta (kuva 112).

Kromin merkitys kasvien aineenvaihdunnassa on toistaiseksi epäselvä, toisaalta sitä pidetään yleensä myrkyllisenä aineena. Jäkälissä oli kromia keskimäärin 2,13 µg/g kuiva-ainetta (vaihtelu 0,30–56,00 µg/g). Tämä on huomattavasti enemmän kuin kasveissa tavallisimmin mitatut kromipitoisuudet 0,02–1,0 µg/g. Suurimmat kromipitoisuudet muodostavat laajan yhtenäisen alueen, joka on paikallisesti yhdistettävissä suureen jaloterästehtaaseen. Erot suurimpien ja pienimpien pitoisuuksien välillä olivat huomattavan suuria (kuva 113).

Lyijy on tunnetusti kasautuva myrkky nisäkkäille ja sen tiedetään olevan myrkyllinen myös monille kasveille. Erityisesti teiden varsien ja myös teollisuusalueiden kasveissa tavataan suuria lyijypitoisuuksia. Jäkälissä oli lyijyä keskimäärin 18 µg/g ja enimmillään 62 µg/g. Suuria pitoisuuksia tavataan erityisesti teollistuneessa Etelä-Suomessa, mutta paikallisesti niitä on myös sisämaassa ja Perämeren pohjoisrannikolla (kuva 114).

Nikkelin tiedetään olevan kasveille myrkyllistä, vaikka

se toisaalta onkin yleinen alkuaine kasveissa. Maaperän nikkelipitoisuus voi vaihdella suuresti ja näkyä myös kasvien nikkelipitoisuuden vaihteluna. Puiden rungoilla ja oksilla kasvavan epifyyttijäkälän nikkelipitoisuuden vaihtelua ei kuitenkaan tässä yhteydessä voitane pitää ensijaisesti maaperän aiheuttamana. Jäkälänäytteissä oli nikkeliä keskimäärin 2,62 µg/g (vaihtelu 0,00–51,82 µg/g). Kasvien normaalit nikkelipitoisuudet vaihtelevat 0,1–5,0 µg/g kuiva-ainetta.

Läntisessä Suomessa oleva suurten nikkelipitoisuuksien alue vastaa kuparin ja kadmiumin suurten pitoisuuksien aluetta. Laajin yhtenäinen suurten nikkelipitoisuuksien alue on kuitenkin Itä-Lapissa, joka johtunee Venäjän teollisuuslaitoksista tulevista päästöistä (kuva 115).

Rikki on lisääntynyt jäkälissä 1980-luvulla

Rikkipäästöjä on pyritty vähentämään erityisesti 1980-luvulla, mutta tämän tutkimuksen tulosten mukaan rikkimäärät eivät kuitenkaan näytä pienentyneen luonnossa. Vuosina 1979–81 maan eri osista kerätyissä Kuopion yliopiston tutkimuksen saman jäkälälajin näytteissä rikkipitoisuus oli 0,37–1,83 mg/g kuiva-ainetta, kun pitoisuudet tässä tutkimuksessa olivat 0,60–2,61 mg/g.

Koska molemmissa töissä näytteitä on myös taustaalueilta, joilla epäpuhtauskuormitus on vähäistä, rikkipitoisuuden voidaan arvella kasvaneen 1980-luvun alkupuoliskon aikana. Alueelliset erot olivat molemmissa tutkimuksissa samanlaiset, eniten rikkiä oli Etelä- ja Kaakkois-Suomesta kerätyissä näytteissä. Jäkälien rikkipitoisuuden alueellisuus vastaa hyvin myös päästöjen perusteella laadittua rikkilaskeumamallia (ks. 1.2 *Ilman laatu Suomessa,* s. 12).

Kuormituksen alueellisista eroista

Sormipaisukarvejäkälän ainepitoisuudet eivät suoraan kerro laskeuman määrää, vaan ilmaisevat sitä lähinnä suhteellisesti. Tulosten perusteella voidaankin vain todeta, että siellä missä pitoisuudet ovat korkeat, myös laskeuma on suurta. Rikin ja typen osalta jäkälistä mitattujen pitoisuuksien ja arvioitujen, päästöjen perusteella laskettuihin laskeumamalleihin perustuvien alueellisten karttojen yhtenevyys on huomattava.

Aiheesta enemmän

Kubin, E. 1989. A survey of element concentrations in the epiphytic lichen Hypogymnia physodes in Finland in 1985–86. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 421–446.

Kubin, E. 1989. Sormipaisukarvejäkälän, Hypogymnia physodes, alkuainepitoisuudet Lapin ja Koillis-Suomen metsälautakuntien alueilla 1986. Teoksessa: Varmola, M. & Palviainen, P. (toim.). Lapin metsien terveys. Metsäntutkimuspäivät Rovaniemellä 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 347: 131–140.

Rühling, Å., Rasmussen, L., Pilegaard, K., Mäkinen, A. & Steinnes, E. 1987. Survey of atmospheric heavy metal deposition in the Nordic countries in 1985. Nord 1987. s. 21.

Rühling, Å., Brumelis, G., Goltsova, N., Kvietkus, K., Kubin, E., Liiv, S., Magnusson, S., Mäkinen, A., Pilegaard, K., Rasmussen, L., Sander, E. & Steinnes, E. 1992. Atmospheric heavy metal deposition in Northern Europe 1990. Nord 1992: 12. s. 41.

Takala, K., Olkkonen, H., Ikonen, J., Jääskeläinen, J. & Puumalainen, P. 1985. Total sulphur contents of epiphytic and terricolous lichens in Finland. Ann. Bot. Fennici 22: 91–100.

7. Paikallisia metsävaurioita ja kokeellisia tutkimuksia

Paikallisia metsävaurioita voi ilmetä sekä ilmansaasteiden suhteen kuormittuneilla alueilla että suhteellisesti puhtaammilla tausta-alueilla. Häiriintyneiden metsäekosysteemien tai niiden osien toimintamekanismeja voidaan lähteä selvittämään myös kokeellisen tutkimuksen keinoin.

Tässä pääluvussa esitetään joitakin esimerkkejä edellämainitun kaltaisista tutkimuksista.

7.1 Tausta-alueet

Pohjois-Suomen neulaskato kesällä 1987

Pohjois-Suomen metsissä havaittiin alkukesällä 1987 odottamaton ilmiö, kun eri ikäisten havupuiden neulaset alkoivat karista ennen aikojaan monin paikon turvemailla sekä lajittuneilla, karuilla kivennäismailla. Kariseminen alkoi vanhimmasta neulasvuosikerrasta ja eteni nuorempiin. Aluksi neulaset kellastuivat ja muuttuivat myöhemmin ruskeiksi ennen karisemista (kuva 116). Paikoin puista karisi kaikki neulaset. Mäntyjen ja kuusien lisäksi vaurioita ilmeni myös koivuissa ja pintakasvillisuudessa. Tuhot yleistyivät loppukesän aikana, jolloin niitä esiintyi myös viljavammilla kivennäismaiden kasvupaikoilla.



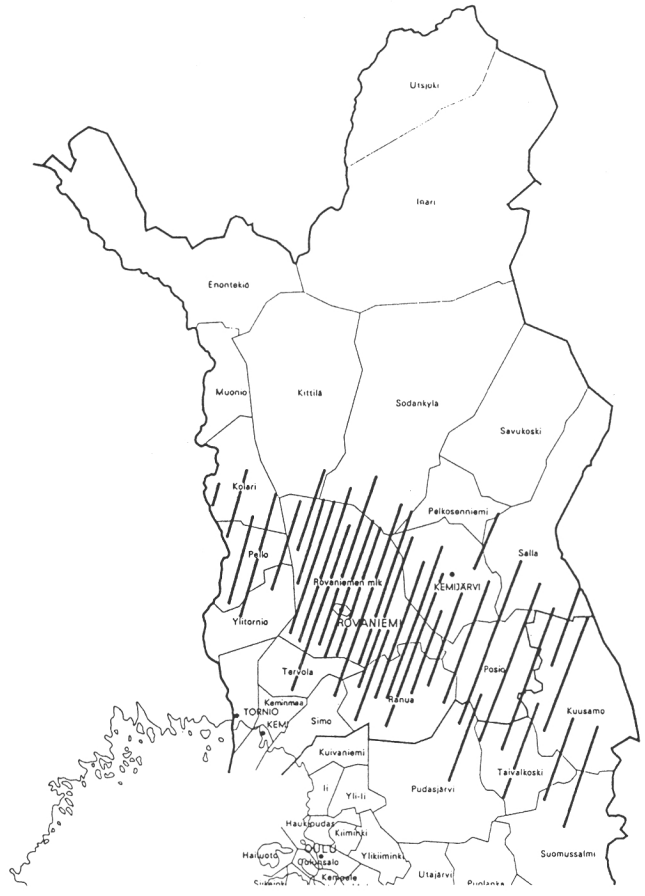
Kuva 116. Neulaskadosta kärsiviä mäntyjä Hietaperänkankaalla Rovaniemen maalaiskunnassa kesällä 1987. Valokuva: Eero Tikkanen.

Neulaskadon syiden tutkiminen aloitettiin kivennäismaalla välittömästi. Männyn neulasten kemiallisen koostumuksen, vesitalouden, vaharakenteen ja solujen mikroskooppisen rakenteen tutkimisen lisäksi tehtiin myös juuristo- ja maantutkimuksia sekä laskeuman laadun mittaus. Neulaskadon laajuutta kartoitettiin metsähallituksen palveluksessa oleville metsäammattilaisille suunnatun kyselyn avulla.

Selvityksen mukaan neulaskatoa esiintyi eniten Etelä-Lapissa ja Kainuussa. Runsaimmin havaintoja tehtiin Rovaniemen maalaiskunnasta ja Pellosta sekä Ranuan pohjoisosasta ja Kemijärven länsiosasta (kuva 117). Kysely ei ollut kuitenkaan kattava Kuusamon, Sallan, Posion, Kemijärven eikä nk. Lapin kolmion osalta, sillä näillä alueilla valtio omistaa vain pienen osan metsämaasta.

Huomio juuristoihin

Rovaniemen maalaiskunnan Hietaperänkankaan mäntytaimikoissa tehdyn tutkimuksen perusteella neulaskadosta kärsivillä männyillä oli ravinne- ja vesitalouden häiriöitä. Nuorista männyistä tehdyt neulasanalyysit osoittivat, että sairaat puut siirsivät normaalia aikaisemmin liikkuvia ravinteita vanhoista neulasista nuoriin kasvaviin osiin. Sen sijaan sellaisia ravinteita, joita kasvit eivät kykene siirtä-



Kuva 117. Neulaskadon esiintyminen kesällä 1987 Pohjois-Suomessa.

mään, oli nuorimmissa versoissa sairailla puilla vähemmän kuin terveillä ja vertailualueen puilla.

Ravinnehäiriöt saattoivat johtua juuristovaurioista, sillä kaikissa tutkituissa taimikoissa oli maa-analyysien perusteella yhtä paljon ravinteita kuin karukkokankailla on keskimäärin. Neulasten vesipitoisuuden mittaus osoitti lisäksi, että juuristovauriot häiritsivät myös puiden vesitaloutta.

Juuristovauriot johtuivat lähinnä vuosien 1986–87 poikkeuksellisista säistä. Neulaskato oli pahinta alueella, jossa tavallista lämpimämmän ja sateisemman syksyn 1986 jälkeen lämpötila laski joulukuun alussa jyrkästi. Ankarat pakkaset routaannuttivat tällöin lähes lumettoman maan nopeasti ja syvälle. Vielä tammikuussa 1987 lumipeite oli 20–30 cm ajankohdan keskiarvoa ohuempi.

Sään osuutta vaurioihin osoittaa myös se, että juuret kestävät kylmää versoja huonommin ja niiden talveentuminen alkaa myöhemmin. Pohjoisessa havumetsässä lumi ja humuskerros suojaavat tavallisesti juuria talvisin. Kuivissa kangasmetsissä humus on kuitenkin tyypillisesti ohut ja heikosti suojaava, joten vähälumiset talvet saattavat olla juurille tuhoisia.

Ilmansaasteetkin saattoivat osaltaan heikentää puiden kestävyyttä, sillä niiden tiedetään aiheuttavan neulasten värimuutoksia ja ennenaikaista varisemista. Hapan laskeuma voi aiheuttaa maan happamoitumista ja liukoisen alumiinin määrän lisääntymistä, mikä johtaa kasvien juuristovaurioihin ja ravinnetalouden häiriöihin. Alumiini ei kuitenkaan todennäköisesti aiheuttanut Hietaperänkankaalla juuristovaurioita, sillä maassa oli liukoista alumiinia melko vähän. Neulasten vaharakenteestakaan ei löydetty happaman laskeuman aiheuttamia vaurioita.

Aiheesta enemmän

Jalkanen, R. 1988. Kovia kokeneet Pohjoisen puut. Teollisuuden metsäviesti 1: 8–11.

Jalkanen, R. 1990. Vauriot Lapin luonnossa talven 1986–87 jälkeen. Teoksessa: Varmola, M. & Palviainen, P. (toim.). Lapin metsien terveys. Metsäntutkimuspäivät Rovaniemellä 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 347: 31–33.

Ritari, A. 1990. Talven 1986–87 sääolojen poikkeuksellisuus ja pakkasvauriot Pohjois-Suomessa. Teoksessa: Varmola, M. & Palviainen, P. (toim.). Lapin metsien terveys. Metsäntutkimuspäivät Rovaniemellä 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 347: 47–57.

Tikkanen, E. & Raitio, H. 1990. Ilmastostressi ja ilmansaasteet — kesän 1987 neulaskadon syitä. Teoksessa: Varmola, M. & Palviainen, P. (toim.). Lapin metsien terveys. Metsäntutkimuspäivät Rovaniemellä 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 347: 34–42.

Sallan puustovauriot

Sallan koillisosassa havaittiin riukuasteen ja sitä vanhemmissa männiköissä kesän 1987 jälkeen laajoja männynversosurman aiheuttamia tuhoja, joihin Kuolan niemimaan saastepäästöjen epäiltiin vaikuttaneen. Sallan koillisosassa kesän 1987 jälkeen havaittujen puustovaurioiden syitä, ja etenkin ulkopuolisen rikkikuormituksen osuutta niihin, tutkittiin männyn neulasista ja maasta tehtyjen ravinneanalyysien sekä kasvumittausten avulla.

Puut kärsivät ravinteiden puutteesta

Sallan alueella männyn neulasissa oli muita alkuaineita paitsi fosforia ja magnesiumia enemmän kuin vertailualueella Keski-Lapissa (taulukko 13). Tämä saattaa johtua osittain eroista alueiden maaperässä, jotka vaikuttavat puiden ravinnetalouteen. Mutta tämä tutkimus ei pienen

Taulukko 13. Männyn neulasten keskimääräiset alkuainepitoisuudet neulasvuosikerroittain toukokuussa 1988.

Alkuaine	Alue ja neulasvuosikerta					
	Salla			Vertailu		
	1985	1986	1987	1985	1986	1987
N, mg/g	1,05	1,05	1,13	0,84	0,84	0,96
P, mg/g	1,39	1,39	1,79	1,18	1,20	1,61
K, mg/g	3,73	3,72	5,08	3,30	3,37	4,96
Ca, mg/g	3,22	2,85	1,72	2,76	2,49	1,74
Mg, mg/g	0,72	0,92	2,03	0,78	0,97	1,14
S, mg/g	0,95	0,96	1,04	0,92	0,94	1,03
Fe, µg/g	71	65	51	63	57	45
Cu, µg/g	2,73	2,95	3,66	2,16	2,37	2,86
Zn, µg/g	53	57	47	45	49	45
Mn, µg/g	850	795	501	680	641	462
Al, µg/g	445	404	323	384	351	282

maanäyteaineiston perusteella kuitenkaan osoittanut eroja alueiden maaperän alkuainekoostumuksissa.

Nuorimpien neulasten ravinneanalyysi osoitti kaikilla tutkittujen alueiden männyillä lievää typen puutetta suhteessa muihin pääravinteisiin. Vanhimmat neulasvuosikerrat osoittivat kaikkien helposti liikkuvien pääravinteiden puutetta. Jos jotain helposti liikkuvaa ravinnetta (N, K, P tai Mg) on liian vähän, puut siirtävät niitä nuorimpiin neulasvuosikertoihin. Siten helposti liikkuvien ravinteiden puutos korostuu vanhoissa neulasvuosikerroissa, ja vain ankarat puutostilat paljastuvat nuorimmista neulasista.

Versosyövän vaivaamissa metsiköissä nuorimpien neulasten typpi-, fosfori-, kalium- ja magnesiumpitoisuuksien kohoaminen saattaa siten johtua ravinteiden siirtymisestä vanhemmista kuolevista neulasista nuorempiin. Todennäköisemmältä vaikuttaa kuitenkin se, että olemassa oleviin ja kasvaviin neulasiin suuntautuu aiempaa suurempi ravinnevirta, koska versosyövän vuoksi puun neulasisto pienenee, mutta juuristo säilyy entisellään.

Rikkipitoisuudet olivat melko alhaisia

Ilman rikkidioksidipitoisuus vaikuttaa myös neulasten rikkipitoisuuteen. Sallan alueella männyn neulasissa oli keskimäärin suhteellisen vähän rikkiä verrattuna teollisuusympäristöissä kasvaviin neulasiin. Rikkipitoisuus oli samanlainen kuin kuivan, karun kankaan männyissä on yleensä Etelä-Lapissa.

Pelkästään nuorimpia neulasia tutkimalla rikkikuormitusta ei voida kuitenkaan luotettavasti selvittää, koska niihin ei ole ehtinyt kerääntyä rikkiä huomattavia määriä,

eivätkä kasvit kykene siirtämään sitä vanhemmista kasvinosista nuorempiin. Nuorimpien ja vanhimpien neulasten rikkipitoisuuksien suhde oli kuitenkin Sallassa pienempi kuin vertailualueella, mikä osoittaa rikkikuormituksen Sallan alueella olevan suhteellisen pienen.

Yhteneviä tuloksia on saatu paisukarvejäkälän alkuainepitoisuuksien mittauksissa Koillis-Lapista. Tutkimukset sammalien raskasmetallipitoisuuksista ovat kuitenkin osoittaneet, että Tunturi-Lapin koillisosaan kulkeutuu ilman epäpuhtauksia Kuolan niemimaalta.

Neulasten alumiini- ja kuparipitoisuudet olivat keskimääräisestä poikkeavia

Sallan alueella neulasten alumiinipitoisuus oli suhteellisen korkea, mikä johtuu osittain alueen maaperästä. Kaikilla tutkituilla alueilla humus- ja huuhtoutumiskerroksessa oli melko paljon liukoista alumiinia. Maan happamoituessa liukoisen alumiinin määrä maassa kasvaa.

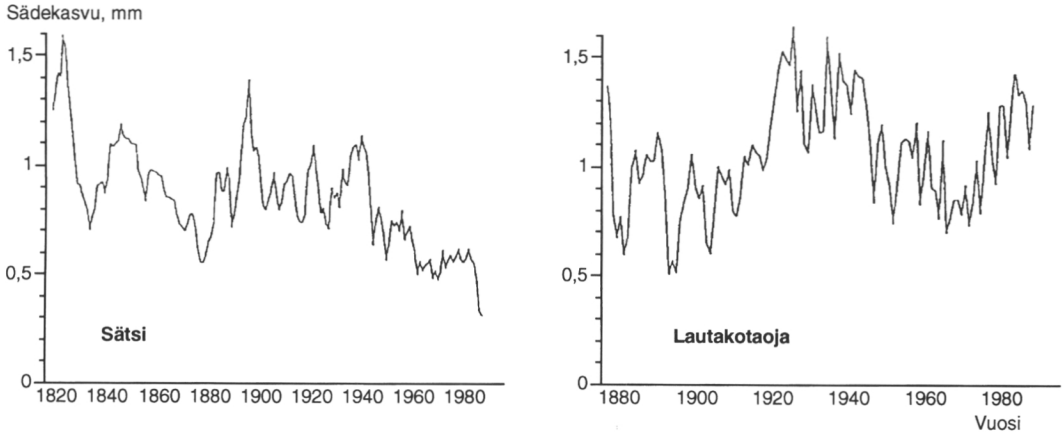
Tutkituista hivenravinteista kuparia oli neulasissa kaikkialla erittäin vähän, jopa alle kirjallisuudessa mainittujen puutosrajojen. Kuparin puute häiritsee kasvien solukoiden puutumista, mikä puolestaan alentaa kylmänkestävyyttä.

Puiden kasvu vaihteli

Kesällä 1987 havaittiin Sallan Sätsissä vakavat versosurmatuhot. Ilmeisesti versosurma on vaivannut alueen puustoa jo usean vuoden ajan ennen tätä, sillä 1980-luvun puolivälin jälkeen puiden paksuuskasvu on siellä heikentynyt selvästi (kuva 118). Sen sijaan Lautakotaojalla versosurmasta huolimatta puiden kasvu on voimistunut vuodesta 1960 lähtien. Sätsin männikkö oli tosin tutkituista pahiten versosurman vaivaama.

Lautakotaojalla maa oli karumpaa ja karkeampaa kuin Sätsissä ja puusto huomattavasti harvempaa kuin Sätsin männikössä; lisäksi Lautakotaojalla metsää oli harvennettu, mutta Sätsissä ei. Pohjoisuuden ja maan laadun takia lieväkin puuston harvennus lienee lisännyt Lautakotaojalla puiden paksuuskasvua huomattavasti. Tämä ei johtune niinkään valon määrän kasvusta vaan juuristokilpailun heikkenemisestä — pohjoisilla karuilla metsätyypeillä puilla on erittäin laaja juuristo.

Puiden paksuuskasvuaineisto oli tässä työssä erittäin pieni. Kasvumittaukset yhdistettynä maan ja neulasten ravinneanalyyseihin osoittivat kuitenkin, että valitsemalla ilmastollisesti äärevistä oloista viljavuudeltaan ja käsittelytavoiltaan erilaisia metsiköitä kasvututkimuksia varten voitaneen ilman epäpuhtauksien vaikutuksia arvioida paremmin kuin ilmastollisesti suotuisissa oloissa.



Kuva 118. Männyn keskimääräinen sädekasvu (mm) Sätsin ja Lautakotaojan näytealoilla.

Versosurman etenemisen syyt

Kasvukauden sääolot vaikuttavat myös neulasten ravinnepitoisuuksiin; kylmän ja sateisen kasvukauden jälkeen puiden ravinnetilanne on normaalia heikompi. Puiden ravinnetilanne puolestaan vaikuttaa niiden pakkaskestävyyteen. Mänty altistuu versosurmalle kylminä ja sateisina kasvukausina, jotka ovat otollisia taudinaiheuttajasienen kehitykselle ja leviämiselle. Kylmien kasvukausien vaikutus kärjistyy epäsuotuisilla kasvupaikoilla, joilla vuorokautiset lämpötilan vaihtelut ovat suuret ja ilman kosteus on suuri. Mänty on herkkä versosurmalle kasvaessaan tiiviillä, hienojakoisilla mailla.

Sallan alueella puiden ravinnetilanne on pääosin maan luontaisten ominaisuuksien takia heikko. Selvää osoitusta saasteiden osuudesta ei kuitenkaan tutkimusten tässä vaiheessa ole olemassa.

On mahdollista, että heikko ravinnetila on altistanut puut versosurmalle Sallan Sätsissä. Alue on lisäksi luonnostaan maan kylmimpiä, ja taudin etenemistä ovat edistäneet 1980-luvun puolivälin jälkeiset normaalikauden 1931–60 keskiarvoja huomattavasti kylmemmät ja sateisemmat vuodet.

Aiheesta enemmän

Aalto-Kallonen, T. & Kurkela, T. 1985. Gremmeniella disease and site factors affecting the condition and growth of Scots pine. Seloste: Versosyöpätauti ja ympäristö männyn kuntoon ja kasvuun vaikuttavina tekijöinä. Commun. Inst. For. Fenn. 126. 28 s.

Kurkela, T. 1981. Versosyöpä (Gremmeniella abietina) riukuasteen männiköissä. Summary: Cancer and dieback of Scots pine at precommercial stage caused by Gremmeniella abietina. Folia Forestalia 485. 12 s.

Raitio, H., Tikkanen, E. & Nöjd, P. 1990. Mäntyjen ravinnetalous Sallan puustovaurioalueella. Teoksessa: Varmola, M. ja Palviainen, P. (toim.). Lapin metsien terveys. Metsäntutkimuspäivät

Rovaniemellä 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 347: 23–31.
Uotila, A. 1989. Ilmastotekijöiden vaikutus männynversosyöpätuhoihin. Summary: The effect of climatic factors on the occurrence of Scleroderris cancer. Folia Forestalia 721. 23 s.

Lehtipuilla lehtikatoa Etelä-Suomessa

Keväällä 1989 lehtipuut puhkesivat lehteen hitaasti ja vajavaisesti Etelä-Suomessa. Ilmiö havaittiin etenkin koivu- ja leppälajeilla sekä haavalla ja raidalla, mutta ei kuitenkaan esimerkiksi pihlajalla. Kesän kuluessa lepät toipuivat koivuja paremmin, sillä vielä syksyllä osa koivuista oli lähes lehdettömiä ja osalla lehvästö oli erittäin harsu (kuva 119). Koivulla on ollut häiriöitä lehteenpuhkeamisessa aikaisemminkin, esimerkiksi vuosien 1986 ja 1987 keväällä. Samanlaisia oireita on todettu 1980-luvun alussa myös pyökillä ja tammella Keski-Euroopassa, ja siellä syyksi on epäilty mm. ilmansaasteita.

Juuret eläviä

Lehvästöltään normaalien, lievästi harsuuntuneiden ja lähes lehdettömien hieskoivujen juurten elävyyttä testattiin kesä-, elo- ja marraskuussa 1989 juurinäytteistä, jotka oli kerätty entisille suopelloille perustetuista koivikoista. Biokemiallinen elävyystesti (TTC) ei kuitenkaan paljastanut eroja juurten elävyydessä. Keväällä kaikkien puiden juurien elävyys oli kuitenkin heikompi kuin syksyllä.

Lehtien ravinnepitoisuuksissa oli eroja

Elokuun puolivälissä 1989 kerättiin lehtinäytteet samoista puista, joista juurinäytteetkin oli otettu. Lähes lehdettömien puiden lehdissä oli typpeä, fosforia, kaliumia, booria, rikkiä, kuparia ja sinkkiä enemmän sekä kalsiumia, magnesiumia ja alumiinia vähemmän kuin lehvästöltään normaaleilla puilla. Raudan ja mangaanin pitoisuuksissa ei ollut eroja terveydentilaltaan erilaisten koivujen lehdissä.

Ravinteita kertyi lähes lehdettömien koivujen lehtiin osittain siksi, että puiden juuristot näyttivät olevan yhtä toimintakykyisiä kuin lehvästöltään normaaleissa koivuissa. Kalsiumia ja etenkin magnesiumia oli puolestaan lähes lehdettömien koivujen lehdissä vähän mm. muiden kationien voimakkaan oton sekä kasvualustan erojen takia.



Kuva 119. Lähes lehdettömiä hieskoivuja heinäkuussa 1989 Karvian Alkkiassa. Valokuva: Erkki Oksanen.

Ennenaikainen lehtien menetys

Kesällä 1988 lehtipuut kärsivät erilaisista tuhohyönteisistä, ennen kaikkea kirvoista, sekä sienitaudeista, esimerkiksi ruostesienistä. Näiden takia osa puista menetti lehtensä ennenaikaisesti, ja osalla puista latvakasvaimet kuolivat, jolloin mm. puiden hormoniaineenvaihdunta häiriytyi.

Ilmeisesti lämpimän kesän, hyvän typpitilanteen ja kärkisilmujen tuhoutumisen vaikutuksesta lehtisilmut puhkesivat uudelleen kasvuun syyskesällä 1988, eivätkä ne ehtineet talveentua kunnolla ja tuhoutuivat siten syksyn ja talven pakkasissa. Tämän takia lehtipuihin syntyi seuraavana keväänä normaalia vähemmän lehtiä. Leppälajeilla myös kukkanorkkoja kuoli, joten todennäköisesti lepän kukintakin oli alkanut tavallisesta poiketen jo syksyllä. Puiden kunto ei liene ollut keväällä 1988 paras mahdollinen jo yksistään edellisten vuosien säiden takia.

Aiheesta enemmän

Raitio, H. 1990. Lehtipuiden harsuuntuminen. Metsäntutkimuspäivä Porissa 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 369: 73–76.

Raitio, H. 1991. Oireilevat lehtipuut. Teollisuuden Metsäviesti 3: 24–25.

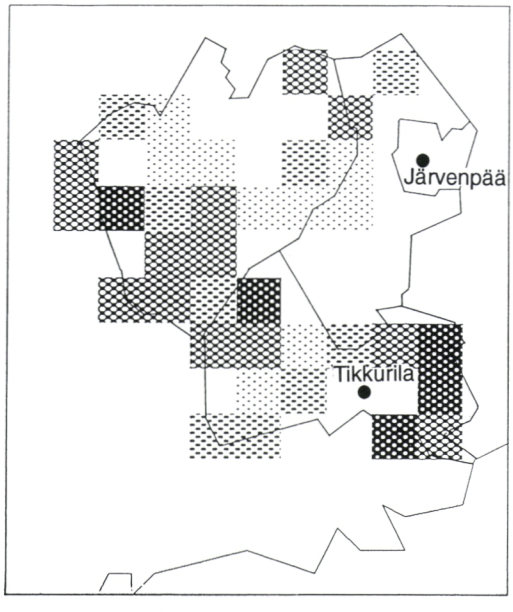
7.2 Kuormitetut alueet

Havupuiden elinvoimaisuus Uudenmaan keskiosissa

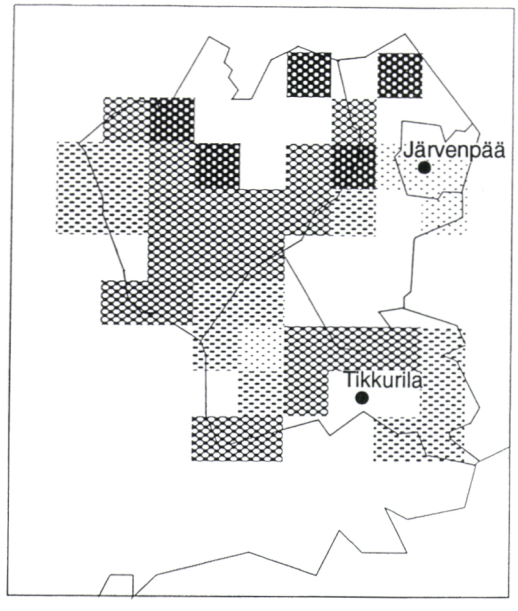
Järvenpään, Nurmijärven, Tuusulan ja Vantaan metsien tilaa selvitettiin vuonna 1986. Metsämaalle perustettiin 96 pysyvää koealaa kahden kilometrin välein valtakunnallista koealaverkkoa täydentämällä. Koealoilta arvioitiin yhteensä 2055 mittauskriteerit täyttävää puuta. Puista arvioitiin niiden koko, latvuksen harsuuntuneisuus ja tuhojen ilmiasu, aiheuttaja ja tuhoaste sekä männyistä lisäksi neulasvuosikertojen määrä. Lisäksi kartoitettiin epifyyttijäkälien esiintymisrunsaus.

Alueen metsät ovat suurimmaksi osaksi kuusivaltaisia lehtomaisia tai tuoreita kankaita. Metsien keski-ikä oli 73 vuotta. Yleisimpänä tuhona oli lahovika 13 %:lla metsämaan alasta. Pystyyn kuolleita puita tavattiin 2 %:lla ja puutavaran laatua alentavia tuhoja 22 %:lla metsämaan alasta.

Tutkituista puista neljännes oli harsuuntunut yli 20 %. Männyn ja kuusen harsuuntuneisuus oli yhtä voimakasta.



Kuva 120. Männyn keskimääräinen harsuuntuminen Uudenmaan keskiosien metsissä (4 x 4 km ruudukkona). Vaaleilla alueilla neulaskato on alle 10 %, tummilla yli 30 %. Valkeilta alueilta ei ole tietoa.



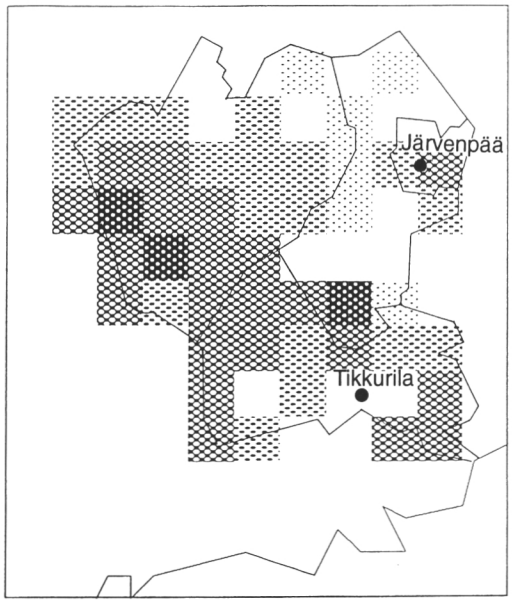
Kuva 121. Männyn neulasvuosikertojen lukumäärä Uudenmaan keskiosissa (keskiarvot laskettu 4 x 4 km ruudulla). Vaaleilla alueilla neulasvuosikertoja alle 2.5, tummilla yli 3.5. Valkeilta alueilta ei ole tietoa.

Alueen havupuut olivat vuonna 1986 jonkin verran harsuuntuneempia kuin koko maan tai eteläisen Suomen havupuut yleensä. Vuoden 1986 jälkeen vuotuisen kartoituksen mukaan etenkin kuusen harsuuntuneisuus on lisääntynyt Etelä-Suomessa. Pääkaupunkiseudulla kasvavat puut ovat Helsingin yliopiston tutkimusten mukaan harsuuntuneempia kuin Uudenmaan keskiosissa.

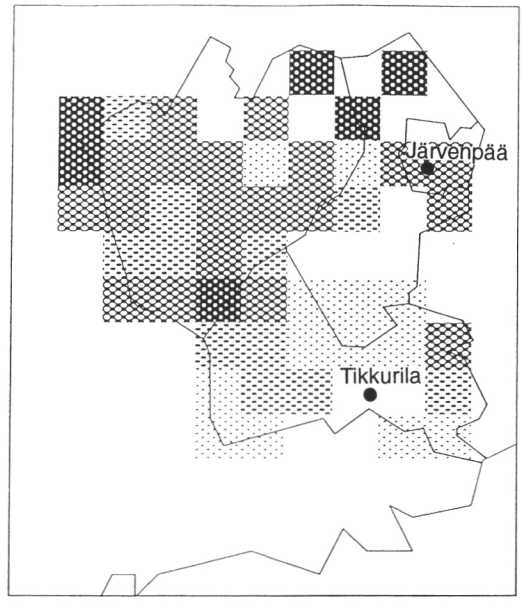
Sekä harsuuntuneisuus että neulasvuosikertojen määrä antoivat saman kuvan tutkitun alueen tilasta. Havupuiden harsuuntuneisuus lisääntyi ja nimenomaan männyn neulasvuosikerrat vähenivät pohjoisesta etelään siirryttäessä (kuvat 120–122). Huonokuntoisimmat metsät sijaitsivat Vantaalla ja Nurmijärven eteläosissa, vähiten harsuuntuneet metsät puolestaan Nurmijärven pohjoisosissa ja Tuusulassa.

Ilmansaasteiden vaikutukset ilmenivät herkkien naavamaisten jäkälien puuttumisena tutkituista metsistä. Kestävämpiä, lehtimäisiä jäkäliä oli sitä enemmän mitä pohjoisempana metsikkö sijaitsi (kuva 123), mutta kaikkia jäkäliä oli vähemmän kuin Helsingin metsälautakunnan alueella tai Etelä-Suomessa yleensä.

Ympäristön saastekuormitus on tutkitulla alueella suurempi kuin keskimäärin Etelä-Suomessa. Tämä näkyi myös metsien kunnon heikkenemisenä pääkaupunkiseutua lä-



Kuva 122. Kuusen harsuuntuminen Uudenmaan keskiosien metsissä (4 x 4 km ruudukkona). Vaaleilla alueilla neulaskato on alle 10 %, tummilla yli 30 %. Valkeilta alueilta ei ole tietoa.



Kuva 123. Lehtimäisten jäkälien (pääasiassa *Hypogymnia physodes*) keskimääräinen runsaus puiden rungoilla ja oksilla Uudenmaan keskiosissa 4 x 4 km:n ruudukolla. Vaaleilla alueilla jäkälien peittävyys on alle 1 %:n, tummilla yli 40 %. Valkeilta alueilta tiedot puuttuvat.

hestyttäessä. Asutuilla seuduilla ilmansaasteiden lisäksi myös muut tekijät rasittavat metsiä. Esimerkiksi rakentaminen muuttaa maaperän kosteusoloja, jolloin puiden vesitalous häiriintyy.

Aiheesta enemmän

Mäkinen, A., Pihlström, M. & Ruuhijärvi, R. 1990. Pääkaupunkiseudun metsien bioindikaattoriseuranta vuonna 1989. Pääkaupunkiseudun yhteistyövaltuuskunta YTV-SAD. Pääkaupunkiseudun julkaisusarja C 1990:7. 118 s.

Typpilaskeuman vaikutukset turkistarhojen lähimetsissä

Suomessa oli enimmillään 1980-luvun loppupuolella yli 5000 turkistarhaa, mutta niiden määrä on viime vuosina voimakkaasti vähentynyt. Pääosa turkistarhoista sijaitsee Kaskisten ja Kalajoen välisellä Pohjanlahden rannikkoalueella. Turkiseläimiä kasvatetaan ympäri vuoden avokatokseen eli varjotaloon sijoitetuissa verkkohäkeissä. Eläinten ulosteet joutuvat ulos häkkien alle. Ulosteiden arvioidaan sisältävän typpeä noin 8 miljoonaa kiloa vuosittain, tästä noin 40 % on haihtuvassa ammoniakkimuodossa. Eläimiä on eniten heinä-syyskuussa, jolloin myös ulosteista haihtuu runsaimmin ammoniakkia.

Suuri osa ulosteiden sisältämästä typestä voi haihtua lyhyessä ajassa, mm. ilman lämpötilasta, ulosteiden typpipitoisuudesta ja happamuudesta riippuen. Ammoniumin laskeumanopeus on suuri, joten päästölähteen lähellä laskeumat ovat myös suurimpia.

Metsissä tapahtuneita muutoksia turkistarhojen läheisyydessä

Puustovauriot turkistarhojen lähellä muistuttavat turvemaiden männiköissä kuvattuja ravinneperäisiä kasvuhäiriöitä tai liiallisen typpilannoituksen aiheuttamia häiriöitä. Latvasilmujen lisäksi kuolee myös yläoksien kärkisilmuja. Muita oireita ovat oksien lisääntyminen oksakiehkuroissa, pystyoksat ja oksien voimakas paksuuskasvu, jolloin puista tulee vuosien kuluessa tyvekkäitä ja pensasmaisia. Latvanvaihdokset heikentävät myös puiden teknistä laatua. Puiden neulasmäärä vähenee ja neulasten väri muuttuu.

Eräiden turkistarhojen lähellä nuorissa männyissä on selviä oireita ravinnepuutoksista. Myös puiden runkojen katkeamista, tuulituhoja ja juuristovaurioita on havaittu. Lisäksi tarhojen lähellä noin 150 metrin etäisyydelle asti puiden rungoilla kasvaa viherlevää.

Selvimmin havaittava pintakasvillisuuden muutos on varpukasvillisuuden väheneminen ja korvautuminen heinäkasvillisuudella. Monissa tapauksissa metsälauha on rehevöitynyt voimakkaasti jopa sulkeutuneissa puolukkatyypin männiköissä.

Laskeuma turkistarhausalueilla

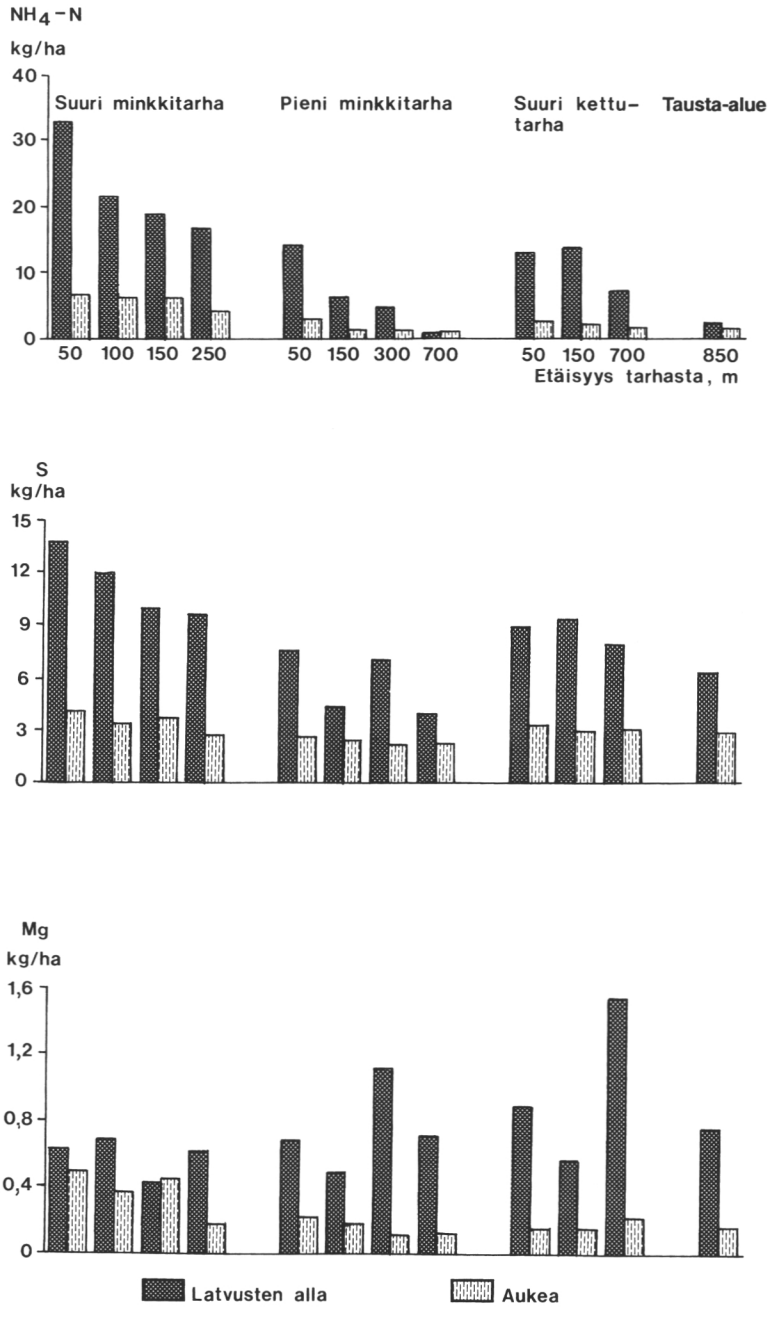
Tässä tutkimuksessa selvitettiin turkistarha-alueiden laskeumamääriä kolmen erilaisen tarhan lähistöllä Pohjanmaalla touko-lokakuussa 1988. Tutkittavana oli suuren minkkitarhan, pienen minkkitarhan ja suuren kettutarhan ympäristöt. Jotta saataisiin selville, miten kauas tarhan vaikutus ulottuu, kokonaislaskeuma kerättiin 50–700 metrin etäisyyksiltä tarhoista. Jokaisessa mittauspisteessä kerättiin sekä aukealle että latvuston alle laskeutuva ainemäärä. Vertailu- eli kontrollialueena, johon turkistarhojen päästöjen ei oletettu vaikuttavan, käytettiin lähes kilometrin etäisyydellä lähimmästä turkistarhasta sijaitsevaa aluetta.

Turkistarhoilta haihtuva ammoniakki ja sen johdannainen ammonium laskeutuvat maahan hiukkasjakoisena kuivalaskeumana tai sateen mukana märkälaskeumana. Kuivalaskeuman osuus voi olla huomattava (ks. 1.2 *Ilman laatu Suomessa,* s. 12). Turkistarhojen lähimetsissä laskeuman laatu ja sen aiheuttamat reaktiot latvustossa ovat selvästi erilaiset kuin puhtailla alueilla. Tämä johtuu laskeuman erittäin korkeasta ammoniumtyppipitoisuudesta.

Tarhojen lähellä latvuston alla todettiin selvästi korkeampia laskeumamääriä kuin aukealla (kuva 124, vrt. *Laskeuma metsiköissä,* s. 40). Tämä osoittaa, että latvusto keräsi tehokkaasti kuivalaskeumaa tai latvustosta huuhtoutui huomattavia määriä puun omia aineenvaihduntatuotteita. Todennäköisesti puut ovat myös voineet hyödyntää aineenvaihdunnassaan laskeuman typpiyhdisteitä suoraan, ilmarakojensa ja lehtisolukkojensa kautta.

Erityisesti tarhojen lähistöllä ammoniumtypen laskeuma oli latvuston alla erittäin korkea, suuren minkkitarhan välittömässä läheisyydessä lähes 33 kg/ha ja muillakin tarhoilla 13–14 kg/ha. Se pieneni selvästi siirryttäessä kauemmas tarhasta, mutta oli esimerkiksi 700 metrin etäisyydellä suuresta kettutarhasta vielä 7 kg/ha. Samoin nitraattitypen laskeumat olivat tarhojen lähialueilla kohonneet, mutta eivät läheskään samassa määrin kuin ammoniumtypen.

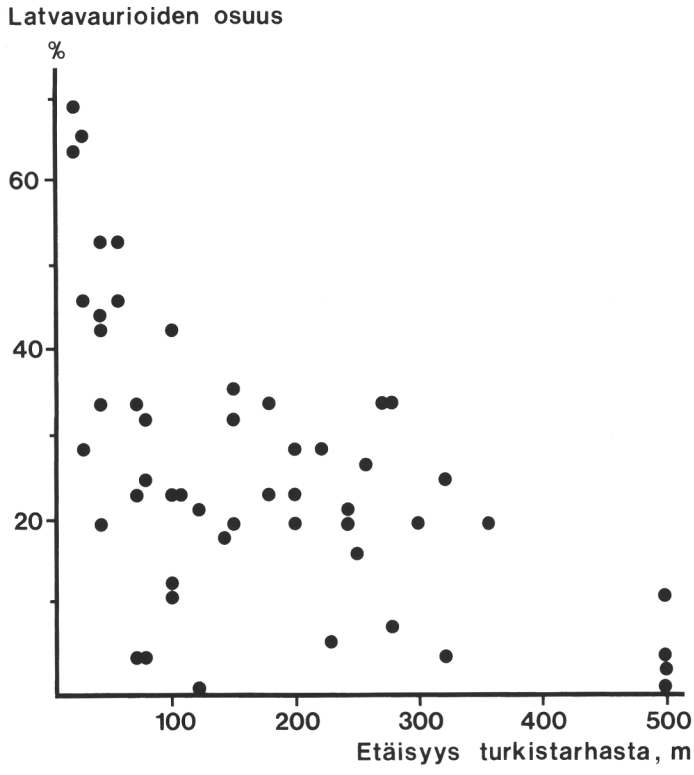
Mitatut typpilaskeumat ovat erittäin suuria verrattuna Pohjanlahden rannikkoalueen keskimääräiseen vuotuiseen typpilaskeumaan, joka on 1–3 kg/ha ammoniumtyppeä ja



Kuva 124. Ammoniumtypen, rikin ja magnesiumin laskeuma eri etäisyyksillä turkistarhoista puiden latvuston alla ja aukealla. Latvuston alla mitatut aukeaa suuremmat laskeumat osoittavat, miten latvusto kerää tehokkaasti kuivalaskeumaa, joka huuhtoutuu sadeveden mukana latvusten alle.

1–2 kg/ha nitraattityppeä. Lähellä normaaliarvoja olevia laskeumia mitattiin tämänkin tutkimuksen kontrollialueilla.

Latvuston alla todettiin myös suuria rikkilaskeumia (kuva 124), mutta aukealla sen sijaan mitattiin alueen normaaliarvoja. Rikkilaskeuman arvot muuttuivat samalla tavoin kuin ammoniumtypen arvot siirryttäessä kauemmas tarhoista, joten ammonium todennäköisesti laskeutui ammoniumsulfaattina.

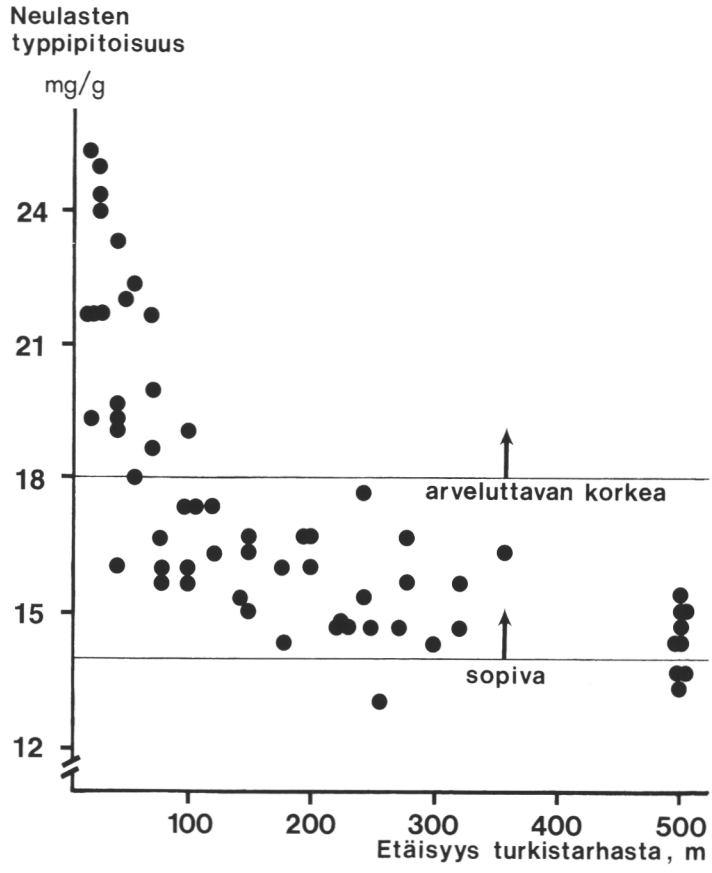


Kuva 125. Vaurioituneita puita oli selvästi eniten lähellä turkistarhoja.

Laskeuman ammonium-ionit vaihtavat ja korvaavat lehvästöistä puille tärkeitä emäskationeja, kaliumia, kalsiumia ja magnesiumia (kuva 124), jotka huuhtoutuvat pois. Lisäksi ammoniumtyppilaskeuma happamoittaa välillisesti maaperää. Viitteitä näistä vaikutuksista ilmeni erityisesti lähimpänä suurta minkkitarhaa sijainneessa mittausmetsikössä. Siellä kalsiumin ja magnesiumin laskeuma latvuston alla oli suhteessa aukealla mitattuun pienempi kuin muissa metsiköissä, eli puista oli jo huuhtoutunut paljon tärkeitä emäsravinteita.

Turkistarhojen lähellä ovat muutokset neulasissa suuria

Puustovauriot olivat suurimmillaan hyvin lähellä tarhoja, alle 150 metrin etäisyydellä (kuva 125). Maan ominaisuuksista ainoastaan humuksen nitraatti- ja ammoniumtyppipitoisuudet muuttuivat siirryttäessä eri etäisyyksille tarhoista; tarhojen lähellä pitoisuudet olivat huomattavasti korkeampia kuin kontrollialueilla. Humuksessa oli ammo-

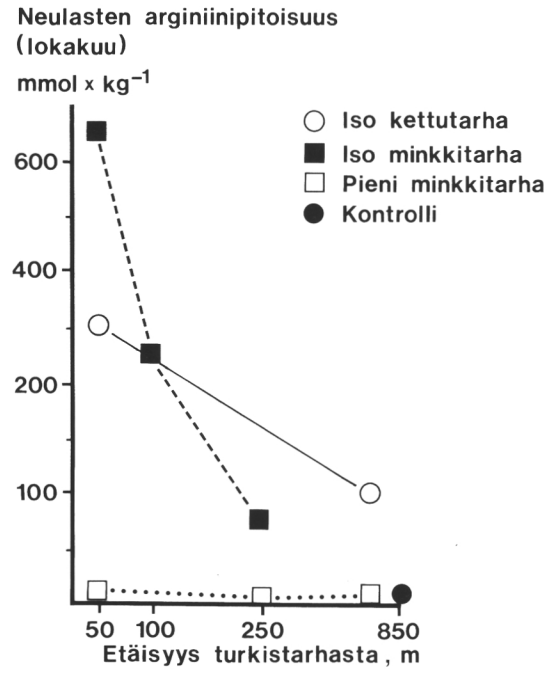


Kuva 126. Lähellä tarhoja neulasissa oli erittäin paljon typpeä, jopa yli 25 mg/g. Vielä 100–150 metrin etäisyydellä typpeä oli vertailuarvoja selvästi enemmän.

niumtyppeä noin 30 kertaa enemmän kuin nitraattityppeä. Näiden liukoisten typpimuotojen lisääntyessä kasvoi myös vaurioituneiden puiden osuus.

Lisääntynyt typpi muuttaa kasvien aineenvaihduntaa

Turkistarhan etäisyyden vaikutus neulasten typpipitoisuuteen on esitetty kuvassa 126. Tutkimuksessa selvitettiin myös liian typen vaikutusta niihin kasvien aineenvaihduntaan kuuluviin reaktioihin ja toimintoihin (mm. valkuaisaineiden muodostuminen), joissa typpi tai typpiyhdisteet ovat keskeisiä aineita. Ammoniakki (ammonium-ionit) tai nitraatit eivät voi sellaisenaan kerääntyä kasvien soluihin kovin suurina pitoisuuksina, vaan kasvit pyrkivät sitomaan ne harmittomaan muotoon, aminohapoiksi tai amideiksi.



Kuva 127. Neulasten arginiinipitoisuudet olivat suuria turkistarhojen läheisyydessä.

Tämän takia seurattiin, miten vapaiden aminohappojen, joita on 50 yhdistettä, määrät vaihtelivat männyn neulasissa eri etäisyyksillä turkistarhoista eri vuodenaikoina. Koska valkuaisaineet eli proteiinit muodostuvat aminohapoista, myös proteiinien kokonaismäärän ja liukoisten proteiinien määrän vaihtelua tutkittiin. Neulasten kykyä puskuroida emäksistä ammoniakkitulvaa vastaan tutkittiin seuraamalla neulasten puskurikapasiteettia ja sen mahdollisia muutoksia.

Männyn neulasissa ylimääräinen typpi sitoutui varsin tehokkaasti aminohappoihin, ennen kaikkea arginiini-nimiseen aminohappoon. Sitä oli turkistarhojen läheisyydessä neulasissa satoja, jopa tuhansia kertoja enemmän kuin kontrollipuiden neulasissa (kuva 127). Myös eräät muut aminohapot, mm. glutamiini, osoittautuivat ylimääräisen typen sitojiksi. Muutokset arginiinin ja muiden aminohappojen määrissä olivat samansuuntaisia ja samansuuruisia kaikkina vuodenaikoina.

Ylimääräisen typen sitoutuminen arginiiniin ja muihin aminohappoihin oli niin tehokasta, ettei soluympäristön happamuus ollut muuttunut typpiyliannostuksesta huolimatta. Neulasten puskurointikyky osoittautui siten varsin tehokkaaksi, eikä siinä ollut merkittäviä eroja eri etäisyyksillä turkistarhoista.

Aminohappojen lisääntyessä turkistarhojen lähimäntyjen neulasissa lisääntyivät vastaavasti myös liukoisten proteiinien pitoisuudet. Eri aminohappojen suhteellisten mää-

rien muutokset heijastunevat myös muodostuvien proteiinien laatuun, mistä onkin jo ensimmäisiä havaintoja.

Liika ammoniumtyppi turkistarhojen lähistöllä muuttaa melkoisesti männyn typpitasetta ja typpiaineenvaihduntaa. Nämä typpiaineenvaihdunnan häiriöt ovatkin todennäköisesti yksi syy mäntyjen talveentumishäiriöihin turkistarhojen lähettyvillä.

Aiheesta enemmän

Ferm, A., Hytönen, J., Kolari, K.K. & Veijalainen, H. 1988. Metsäpuiden kasvuhäiriöt turkistarhojen läheisyydessä. Summary: Growth disturbances of forest trees close to fur farms. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 320: 1–77.

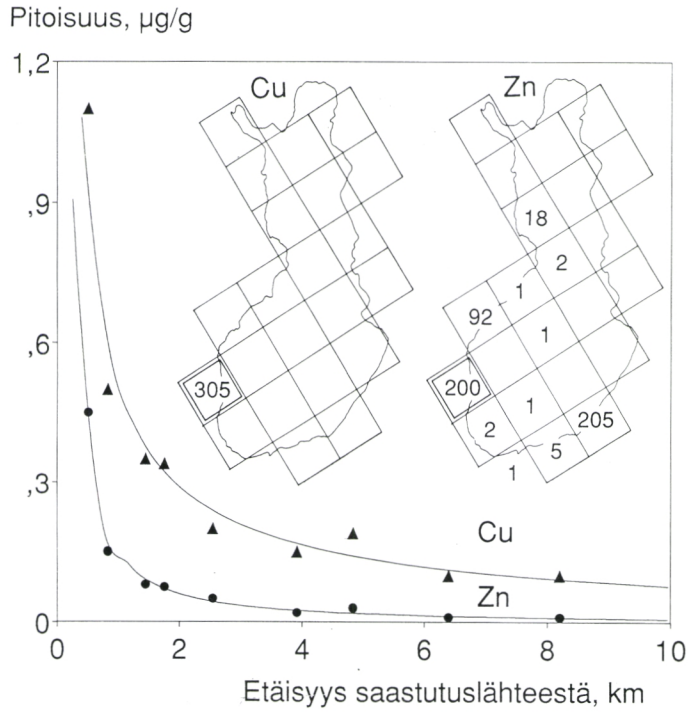
Ferm, A., Hytönen, J., Kolari, K.K. & Veijalainen, H. 1989. Metsäpuiden kasvuhäiriöt turkistarhojen läheisyydessä. Abstract: Growth disturbances of forest trees close to fur farms. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 322: 78–82.

Ferm, A., Hytönen, J., Lähdesmäki, P., Pietiläinen, P. & Pätilä, A. 1989. Effects of high nitrogen deposition on forest: Case studies close to fur animal farms. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 635–668.

Tuhohyönteisten menestyminen kuormitetuilla alueilla

Ilmansaasteet vaikuttavat eri tavoin hyönteislajien runsauteen. Esimerkiksi raskasmetallit lienevät suoraan myrkyllisiä metsähyönteisille, kun taas rikkidioksidi vaikuttaa hyönteisiin etupäässä isäntäkasvin välityksellä. Rikkidioksidin on todettu mm. lisäävän neulasten hiilihydraatti- ja valkuaisainepitoisuuksia ja parantavan näin hyönteisten ravinnon laatua. Myös hyönteisten elintavat vaikuttavat merkittävästi niiden myrkyllisten aineiden määriin, joiden kanssa ne joutuvat kosketuksiin.

Saastuneisuuden jyrkkää muuttumista siirryttäessä vähittäin kauemmas yksittäisestä teollisuuslaitoksesta voidaan pitää mallina saasteiden pitkäaikaisvaikutuksista yleisemminkin metsäluonnossa. Tutkimusalueena käytettiin pahoin saastunutta Harjavallan kaupunkia ja sen suhteellisen puhdasta ympäristöä (kuva 128). Harjavallan huomattavimmat ilmansaasteet ovat raskasmetallit ja rikkidioksidi. Tehtaiden lähellä todettiin erittäin korkeita kupari-, rauta-, nikkeli- ja kadmiumpitoisuuksia männynneulasissa.



Kuva 128. Kuparin ja sinkin pitoisuudet männyn neulasissa Harjavallassa. Kartoissa on esitetty kuparin ja sinkin päästöt tonneina vuonna 1986. Tutkimusalue sijaitsee vahvennetussa ruudussa.

Kirvat ja kaarnakuoriaiset hyötyvät ilmansaasteista

Tutkimusalueella useimpia tuhohyönteisiä oli eniten kohtalaisesti saastuneella alueella. Pahiten saastuneella alueella aivan tehtaiden tuntumassa useimpia tuholaisia oli hyvin vähän, poikkeuksena kuitenkin kirvat ja kaarnakuoriaiset, jotka näyttävät sietävän hyvinkin suuria saastemääriä.

Kaarnakuoriaisia on voimakkaasti saastuneella alueella erityisen paljon. Kuusen kaarnakuoriaisista runsaimpana esiintyi suomuniluri, joka ei ole kuitenkaan metsätaloudellisesti merkittävä huolimatta suuresta jälkeläistuotannostaan.

Männyn kaarnakuoriaisista runsaimpana esiintyi pystynävertäjä (kuva 129). Lajin iskeytymistiheys alueen kituvissa männyissä oli harvinaisen suuri, useissa puissa oli yli 300 syömäkuviota neliömetrillä. Se myös tuotti paljon jälkeläisiä, enimmillään yli 3000 ja keskimäärin 1130 uutta kuoriaista aikuistui neliömetrillä puun runkoa. Aikaisemmin luonnossa on vain poikkeuksellisesti todettu yli 1000 jälkeläistä neliömetriä kohden.

Saasteiden riiduttamat, pystyynkuolevat puut tarjoavat ilmeisesti pystynävertäjälle erityisen hyvät lisääntymisolosuhteet, sillä puiden juuriyhteyden säilyminen takaa riittävän kosteuden säilymisen jälkeläistölle. Pysty-



Kuva 129. Pystynävertäjä lisääntyy erityisesti tukkipinoissa ja menestyy pahoinkin saastuneilla alueilla. Runsaat pystynävertäjäkannat uhkaavat teollisuusalueiden lähimetsiä. Valokuva: Kari Heliövaara.

nävertäjän menestyminen saastuneella alueella merkitsee lisäksi vaaratekijää kasvaville puille, sillä pystynävertäjät hakeutuvat mäntyjen latvaversoihin. Saasteiden heikentämillä männyillä ei kuitenkaan ole varaa ylimääräisten versojen ja yhteyttävän solukon menettämiseen.

Kaukana tehtaista, päästölähteen vaikutusten ulottumattomissa useimpia tuholaisia oli suhteellisen vähän ja niiden aiheuttamat tuhot olivat vain paikallisia. Tuhohyönteislajien välillä ei esiintynyt kilpailua, vaan lajit näyttivät hieman hyötyvän toistensa aiemmasta tai samanaikaisesta esiintymisestä samassa puuyksilössä.

Samalla kun tuholaiset olivat runsastuneet tutkimusalueella, monet metsätalouden kannalta merkityksettömät tai hyödylliset hyönteiset olivat harvinaistuneet. Männyn kuoren eläimistön rakenteen havaittiin muuttuneen oleellisesti vaihtelevammaksi ja satunnaisemmaksi saastelähteen läheisyydessä.

Saastuneiden alueiden hyönteisten tutkimus voi tuottaa ainakin hyönteistieteellisessä mielessä yllätyksiä. Teollisuussaasteiden eniten vaivaamista kituvista, muutaman metrin mittaisista männyistä tavattiin vihreän metallinhohtoisia kovakuoriaisia. Laboratoriossa hyönteiset tunnistettiin *Melanophila formaneki*-jalokuoriaiseksi, joka oli maalle uusi laji. Aiemmin lajia tunnetaan harvinaisena vain muutamista paikoista Euroopasta ja Siperiasta. Mahdollisesti harsujen puiden saama lisääntynyt auringonvalo sekä nokiset, tummat rungot nostavat runkojen lämpötilaa niin paljon, että runsaasti lämpöä vaativien jalokuoriaisten elinolot paranevat.

Pilkkumäntypistiäistuho Harjavallassa

Vuonna 1989 Harjavallassa havaittiin laaja, noin 1000 hehtaarin tuhoalue, jonka männyt pilkkumäntypistiäinen oli syönyt lähes paljaiksi (kuva 130). Tuho sattui alueella, jossa monien muiden männyllä elävien haitallisten hyönteisten on havaittu jatkuvasti esiintyvän poikkeuksellisen runsaslukuisina.

Jo vuonna 1987 oli havaittavissa merkkejä mäntypistiäisen odotettavissa olevasta tuhosta. Mäntypistiäistuhot alkavat yleensä paikoilta, joilla männyt ovat keskimääräistä heikompia esimerkiksi karun maaperän takia. Harjavallassa tuhoalueen männyt olivat saasteiden heikentämiä. Mäntypistiäistuhot toistuvat tosin epäsäännöllisin välein eri alueilla, mutta saasteiden ja hyönteistuhon yhteys vaikuttaa ilmeiseltä, sillä alueella ei ole ollut mäntypistiäistuhoja aikaisempina vuosikymmeninä.

Ilmansaasteiden osallisuutta pilkkumäntypistiäistuhon syntyyn tukevat myös tuoreet tulokset siitä, että lähisukuisen ruskomäntypistiäisen munista kehittyi toukiksi sitä suurempi osa mitä happamammalla vedellä niitä käsiteltiin. Lisäksi mäntyjen harsuuntuminen, vähentynyt aluskasvillisuus ja maan pinnalle kertyvä noki muuttavat todennäköisesti lämpöoloja ja mäntypistiäisiä saalistavien petojen määrää maassa, joissa pilkkumäntypistiäiset talvehtivat.

Kokeellisissa tutkimuksissa ilmansaasteilla todettiin kuitenkin olevan enimmäkseen haitallisia vaikutuksia mäntypistiäisten toukkien kehitykseen (ks. *Ilmansaasteiden vaikutukset männyn neulastuholaisiin*, s. 186).

Saasteiden ja tuhohyönteisten yhteyksien selvitys on tärkeää

Koska ilmansaasteet vaikuttavat myös puiden taudinalttiuteen, saasteiden vaikutukset hyönteisten yleisyyteen ja runsauteen saattavat olla odottamattomia. Lukuisia esimerkkejä ilmansaasteiden aiheuttamista tuhohyönteisten massaesiintymisistä tunnetaan. Kuitenkin syy-seuraussuhteet ovat usein epäselviä tai vaikeasti ymmärrettäviä eikä niiden perimmäisiä syitä tavallisesti tunneta. Eräät lajit saattavat runsastua niin paljon, että kokonaan uusia tuholaisina pidettäviä metsähyönteisiä ilmaantuu, jotkut muut lajit puolestaan saattavat jyrkästi vähentyä.

Tutkimuksissa tulisikin pyrkiä paljastamaan saastelaskeumien ja tuholaisten runsauden väliset yhteydet sekä selittämään hyönteislajien populaatiodynamiikan muutoksia. Vieläkin tärkeämpää on hankkia yksityiskohtaista tietoa todellisista riippuvuussuhteista saasteiden ja yksittäisten hyönteislajien välillä. Tämän vuoksi kenttähavaintojen tueksi tarvitaan täydentäviä kokeellisia ja laboratoriotutkimuksia.





Kuva 130. Pilkkumäntypistiäisen toukkaryhmä ja toukkien neulasettomiksi kaluamia mäntyjä Harjavallassa. Valokuvat: Kari Heliövaara.

Aiheesta enemmän

Heliövaara, K. & Väisänen, R. 1988. Interactions among herbivores in three polluted pine stands. Silva Fennica 22: 283–292.

Heliövaara, K. & Väisänen, R. 1989. Invertebrates of young Scots pine stands in the industrialized town of Harjavalta. Silva Fennica 23: 13–19.

7.3 Kokeellisia tutkimuksia

Männyntaimien alkukehitys saastuneessa maassa

Tutkimuksessa selvitettiin kesällä 1985 ja 1986 lähinnä kuparin saastuttaman maan vaikutusta männyn siementen itämiseen ja taimettumiseen.

Harjavallan kuparisulaton ja rikkihappotehtaan läheisyydestä valittiin neljä koealaa kanerva- ja jäkälätyypin kasvupaikoilta, joiden etäisyydet päästölähteistä kaakkoon olivat 0,5 km, 1,6 km, 2,2 km ja 7,0 km. Kauimmaisen koealan katsottiin sijaitsevan tehtaan vaikutuksen ulkopuolella. Männyn siementen itämistä ja taimien alkukehitystä seurattiin kasvihuoneessa koealoilta otetuissa häiriintymättömissä maanäytteissä neljästä viiteen viikkoa.

Maassa ja kasveissa oli paljon kuparia

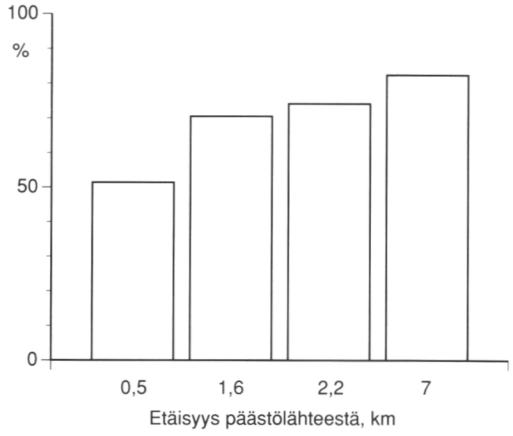
Maaperän kuparipitoisuudet laskivat etäännyttäessä päästölähteestä (taulukko 14). Humus- ja huuhtoutumiskerrosten kuparipitoisuudet ylittivät selvästi Turun ja Porin lää-

Taulukko 14. Humus- ja huuhtoutumiskerroksen kuparipitoisuudet mitattuna kanerva- ja jäkälätyypin kasvupaikoilta eri etäisyyksiltä Harjavallan kuparisulaton ja rikkihappotehtaan läheisyydestä.

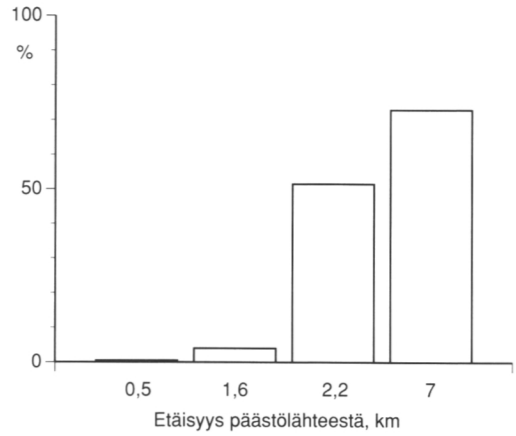
Etäisyys päästölähteestä km	Humuskerros kuparia		Huuhtoutumiskerros kuparia	
	mg/kg	mg/l	mg/kg	mg/l
0,5	650,5	556,5	44,3	61,7
1,6	316,1	205,4	6,2	8,4
2,2	141,5	94,7	3,6	5,2
7,0	3,1	3,5	0,1	0,1

Taulukko 15. Kasvinäytteiden versojen ja juurien kuparipitoisuudet mitattuna eri etäisyyksiltä päästölähteestä. Tutkimusalue sama kuin taulukossa 14.

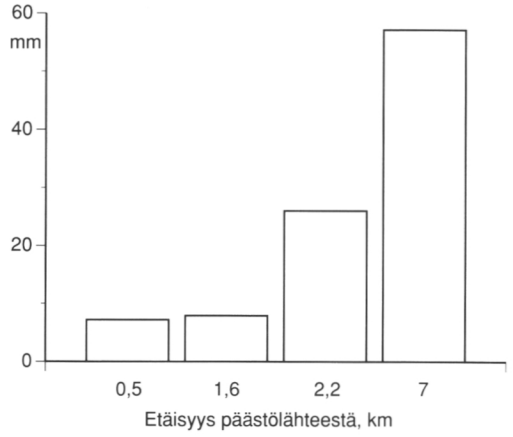
Etäisyys päästölähteestä km	Versot kuparia mg/kg	Juuret kuparia mg/kg
0,5	614,7	1877,9
1,6	98,9	553,3
2,2	16,5	267,1
7,0	3,3	160,7



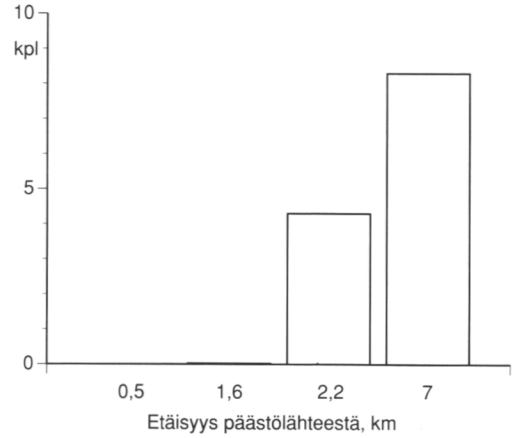
Kuva 131. Männyn siementen itävyys eri etäisyyksillä Harjavallan kuparisulatosta ja rikkihappotehtaasta. Jokaisessa kokeessa kylvettiin 600 siementä. Maan saastuneisuus ei heikentänyt olennaisesti siementen itävyyttä, mutta se vaikutti selvästi syntyneiden taimien kehitykseen.



Kuva 132. Alkeisneulasasteelle kehittyneiden männyntaimien osuus. Koejärjestely on sama kuin kuvassa 131. Taimet olivat kitukasvuisia ja alkeisneulaset kasvoivat kahdella pahimmin saastuneella kasvualustalla vain 0–5 % puhtaalla alustalla (etäisyys päästölähteestä 7 km) kasvaneisiin verrattuna.



Kuva 133. Juurten keskimääräinen pituus (mm). Koejärjestely on sama kuin kuvassa 131. Jopa puolet pahiten saastuneessa maassa kasvaneiden sirkkataimien juurista oli menettänyt normaalin maahakuisen kasvutapansa, eivätkä taimet pystyneet kiinnittymään kasvualustaan. Juurten kärjistä 96–99 % oli käyristyneitä ja kuolleita.



Kuva 134. Juurten haarojen keskimääräinen lukumäärä. Koejärjestely on sama kuin kuvassa 131. Raskasmetallien kuormittamilla alueilla, esim. Kanadassa, on havaittu taimien alustaan kiinnittymisen häiriintyvän herkästi. Tähän vaikuttaa mm. se, etteivät juuret haaraudu tarpeeksi. Juurten haarautuminen estyi lähes kokonaan pahiten saastuneissa maissa kasvaneissa taimissa.

nin viljelysmaista määritetyn keskiarvon 2,9 mg/l. Ne olivat myös korkeampia kuin yleensä kasveille myrkyllisenä pidetyt pitoisuudet 50–100 mg/kg. Muista määritetyistä alkuaineista esimerkiksi rauta, sinkki ja alumiini eivät ylittäneet myrkyllisyysrajoja.

Kasvinäytteiden juurissa oli enemmän kuparia kuin versoissa (taulukko 15). Päästölähteen läheltä 0,5 km ja 1,6

km etäisyydeltä otetuissa maanäytteissä kasvaneiden taimien versoissa kuparia oli selvästi yli kirjallisuudessa mainitun myrkyllisyysrajan 20 mg/kg.

Taimien alkukehityksessä oli häiriöitä

Saastuneessa maassa siemenet itivät kohtalaisesti, mutta taimien alkukehitys, erityisesti juuriston alkukehitys oli häiriintynyt (kuvat 131–134). Juurten kasvu ja kehittyminen voivatkin olla herkkä mittari arvioitaessa raskasmetallien haitallisuutta metsäluonnolle. Ainakin elohopea, kadmium ja sinkki sekä kupari ovat havupuiden juurille myrkyllisiä.

Näiden kokeiden perusteella luontainen taimettuminen Harjavallan tehtaiden lähimaastossa näyttää lähes mahdottomalta. Vaikka siemenet itäisivätkin, taimet eivät kehity elinkelpoisiksi. Päästölähteiden välittömässä läheisyydessä aluskasvillisuus on lähes kokonaan kadonnut ja maa on paljas. Vanhimmat puut ovat elossa ehkä siksi, että niiden juuristo ulottuu saastuneen pintamaakerroksen alapuolelle. Sen sijaan aivan nuoria siemensyntyisiä taimia ei alueella ole.

Aiheesta enemmän

Patterson, W.A. & Olson, J.J 1983. Effects of heavy metals on radicle growth of selected woody species germinated on filter paper, mineral and organic soil substrates. Can. J. For. Res. 13: 233–238.

Sippola, J. & Erviö, R. 1986. Raskasmetallit maaperässä ja viljelykasveissa Harjavallan tehtaiden ympäristössä. Ympäristö ja terveys 17(5): 270–275.

Happaman kastelun vaikutus sienitautien esiintymiseen

Taudin puhkeamiseen puussa vaikuttavat sekä puun kunto, taudinaiheuttajan voimakkuus että ympäristöolot. Ilman epäpuhtaudet voivat olla haitallisia paitsi puille, myös taudinaiheuttajille. Suomessa on kuitenkin vain joidenkin suurimpien teollisuuslaitosten lähellä taudinaiheuttajille haitallisen paljon ilman epäpuhtauksia. Tietoa tarvitaankin ensisijaisesti lievien saastepitoisuuksien ja lievän happamoitumisen vaikutuksista puiden taudinalttiuteen.

Puiden taudinkestävyys perustuu niiden puolusreaktioihin tai kemialliseen koostumukseen. Puolustusreaktiot toimivat parhaiten hyväkuntoisilla puilla; energiaa kuluu niihin tavallista enemmän tai niitä varten puun on aineen-

vaihdunnassaan tuotettava tiettyjä aineita, esimerkiksi pihka-aineita. Ilman epäpuhtaudet voivat heikentää puiden taudinkestävyyttä heikentämällä puiden kuntoa. Ne voivat vaikuttaa taudinkestävyyteen myös mm. vaurioittamalla neulasia tai muuttamalla neulasten tai lehtien pintamikrobistoja.

Onko männynversosurman yleistymisen syynä ilman epäpuhtaudet?

Viime vuosikymmeninä männynversosurmaa on ollut kaikenikäisissä männiköissä enemmän ja useammin kuin aikaisemmin. Epidemiat ovat puhjenneet männyn kannalta epäedullisten kasvukausien jälkeen, mutta myös ilman epäpuhtauksien on epäilty vaikuttaneen versosurmatuhojen yleistymiseen.

Ilman epäpuhtauksien osuutta tuhoihin voidaan tutkia vain kokeissa, joissa puut kasvavat happamuudeltaan tai epäpuhtauspitoisuudeltaan erilaisissa kasvualustoissa muiden ympäristötekijöiden pysyessä muuttumattomina.

Hapan laskeuma saattaa vaikuttaa versosurman esiintymiseen myös lisäämällä versojen pintasolukoiden happamuutta, sillä happamuus vaikeuttaa versosurmasienen itämistä.

Koejärjestelyt

Sadeveden happamuuden muutosten vaikutusta männyn versosurma-alttiuteen tutkittiin kokeellisesti vuosina 1987 ja 1988. Koetaimet kasvatettiin taimitarhassa kaksivuotiaiksi, minkä jälkeen ne istutettiin peruslannoitettuun kasvuturpeen ja hiekan seokseen (4/1) muoviruukkuihin.

Kokeissa taimien kasteluvesien happamuuksina olivat pH 5,6 (normaali), pH 4,5 (vastaa Etelä-Suomen sadevesiä), pH 4,0 ja pH 3,0. Kokeissa osa taimista kasvatettiin muovikatoksessa ja osa avomaalla. Osa taimista kasteltiin vain juurille, osassa kokeista kasteltiin koko taimi.

Kokeet aloitettiin vuonna 1987, ja ne uusittiin 1988. Taimia oli kokeissa ensimmäisenä vuonna 320 kappaletta ja toisena vuonna 640 kappaletta. Niitä kasteltiin kolme kertaa viikossa koko kasvukauden ajan 5 mm kerrallaan, joka vastaa noin 300 mm sadetta kasvukaudessa. Kasteluveden eri happamuustasot saatiin laimentalla rikki- ja typpihappoa veteen.

Taimet saastutettiin kaksi kertaa kasvukauden aikana, heinäkuun lopussa ja elokuun alussa, versosyöpäsienen kuromaitiöliuoksella niin, että joka toinen taimi sai pääverson päätesilmuun 3 miljoonaa itiötä. Talven yli taimet olivat avomaalla lumen peittäminä, ja tuhot inventoitiin keväällä heti lumen sulettua. Tauti todettiin oireiden tai kuromapesäkkeiden perusteella.

Kokeet tehtiin luonnonoloissa koekentällä, jossa normaalista huomattavasti poikenneet kasvukausien säät vaikuttivat puiden kuntoon kontrolloitujen käsittelyjen lisäksi.

Hapan kastelu ei vaikuttanut sairastumiseen

Hapan kastelu ei vaikuttanut männyn taimien sairastumiseen, vaan ensimmäisenä vuonna kaikki sieni-itiöillä saastutetut taimet sairastuivat riippumatta happokäsittelystä. Tämä osoittaa, että taimien vastustuskyky oli heikko. Luonnonsaastuntaa ei ollut, koska yhtään saastuttamatonta tainta ei sairastunut. Toisena koevuotena versosurmaitiöillä saastutettuja taimia sairastui vähemmän, mutta silloin taas luonnon saastuntaa oli runsaasti.

Säät poikkesivat tutkimuskesinä toisistaan huomattavasti. Vuosi 1987 oli kylmin 20 vuoteen (lämpösumma 980 dd), vuosi 1988 puolestaan lämpimimpiä (lämpösumma 1370 dd; keskimääräinen lämpösumma on ollut noin 1200 dd). Lämpöoloihin nähden erot sairastuvuudessa eri kesinä olivat odotettua pienemmät. Oletettavasti taimia olisi sairastunut ensimmäisenä vuonna huomattavasti enemmän, huomioon ottaen versosurmaitiöllä saastutetut ja luonnon tartunta yhteensä, jos luonnon saastunta olisi ollut toisen vuoden kaltainen.

Happaman sateen vaikutus koivunruosteeseen

Happaman sateen vaikutusta koivunruosteeseen tutkittiin Suonenjoen taimitarhalla simuloiduilla hapansadetuskäsittelyillä, joissa kasteluveden pH-arvot olivat 3,0 ja 4,0 sekä kontrollikokeessa pH 5,6. Rauduskoivun taimia kasvatettiin kahtena vuonna kasvukauden ajan muovikatoksessa koekentällä ja sadetettiin kaksi kertaa viikossa vedellä, jonka happamuutta säädeltiin rikki- ja typpihapon seoksella, jossa H_2SO_4/HNO_3-suhde oli 3/1. Sadetus vastasi noin 300 mm:n sadetta kasvukaudella.

Heinä-elokuussa saastutettiin koivunruosteella jokaisesta käsittelystä viisi tainta, joista ruoste levisi edelleen muihin taimiin, kun itiöitä vapautui uusien pesäkkeiden muodostuessa. Kokeen aikana seurattiin ruosteen kehitystä, määritettiin ruosteisuuden yleisyyttä, mitattiin taimien kasvu ja verrattiin eri happamuuskäsittelyjen ja puhtaan veden käsittelyn vaikutuksia.

Sadetus happamalla vedellä ei vaikuttanut taimien pituuskasvuun yhden kasvukauden aikana. Sen sijaan koivujen lehdet kasvoivat kontrollia huomattavasti suuremmiksi ja koivunruostetta oli merkitsevästi enemmän happamalla vedellä kasteltaessa.

Aiheesta enemmän

Kurkela, T. 1981. Versosyöpä riukuasteen männikössä. Folia Forestalia 485. 12 s.

Uotila, A. 1988. Ilmastotekijöiden vaikutus männynversosyöpätuhoihin. Folia Forestalia 721. 23 s.

Vuorinen, M. 1990. Effects of simulated acid rain on the susceptibility to sclerodermis canker (Axcocalyx abietina (Lagerb.) Schlöpher-Bernhard) and on assimilation and transpiration of Scots pine seedlings. Teoksessa: Kauppi, P., Anttila, P. & Kenttämies, K. (toim.). Acidification in Finland. Springer-Verlag. s. 469–475.

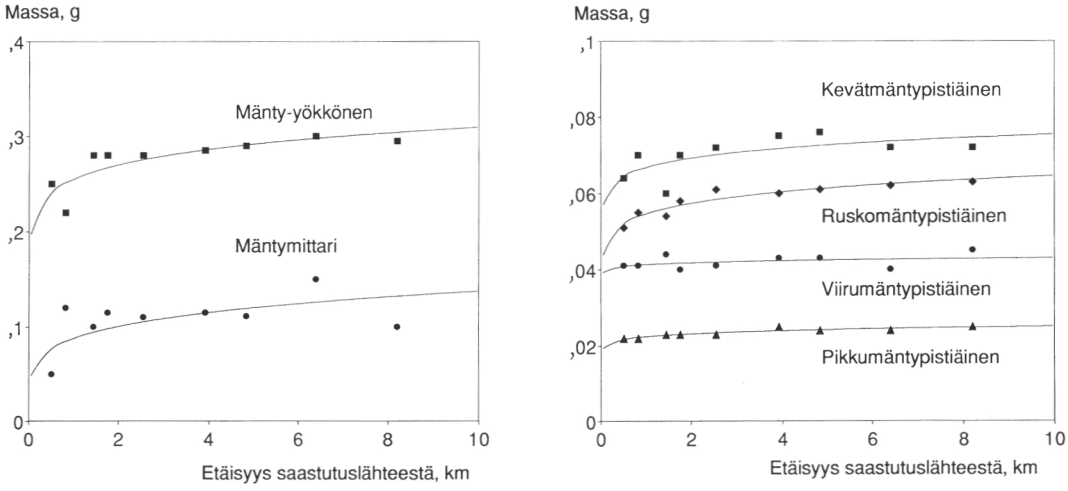
Ilmansaasteiden vaikutukset männyn neulastuholaisiin

Ilmansaasteiden vaikutuksia puilla eläviin hyönteisiin voidaan kokeellisesti tutkia valvotuissa oloissa. Tässä tutkimuksessa selvitettiin, miten männyn neulastuholaisten määrä vaihteli saastuneisuuden muuttuessa ja mistä vaihtelu johtui. Laboratoriokasvatuksissa käytettiin eriasteisesti saastuneita männynneulasia useiden eri hyönteislajien ravintona. Saasteista tärkeimpiä olivat raskasmetallit. Tutkittuja hyönteislajeja olivat mäntymittari, mänty-yökkönen, rusko-, pilkku-, kevät-, viiru- ja rypäsmäntypistiäinen (taulukko 16). Hapotuskokeissa tutkittiin ruskomäntypistiäisen alkionkehitystä happamuuksilla, jotka vaihtelivat pH 2 ja pH 7 välillä.

Saastuneella ravinnolla kasvatettujen perhosten ja pistiäisten kotelopainot jäivät kaikissa lajeissa pienemmiksi kuin puhtaammalla ravinnolla kasvatettujen vertailuhyönteisten kotelopainot (kuva 135). Eräiden lajien koko pieneni huomattavasti, esimerkiksi mäntymittarinaaraan paino putosi jopa puoleen.

Taulukko 16. Piirteitä tutkittujen männyllä elävien hyönteislajien elämäntavoista.

Laji	Toukkien esiintyminen	Yleisyys	Runsaus	Merkitys tuholaisena
Mäntymittari	yksittäin	yleinen	melko runsas	paikallisesti merkittävä
Mänty-yökkönen	yksittäin	yleinen	melko runsas	vähäinen
Ruskomäntypistiäinen	ryhminä	yleinen	ajoittain hyvin runsas	hyvin merkittävä
Pikkumäntypistiäinen	yksittäin	melko yleinen	harvalukuinen	yleensä vähäinen
Kevätmäntypistiäinen	ryhminä	yleinen	harvalukuinen	vähäinen
Viirumäntypistiäinen	yksittäin	yleinen	melko harvalukuinen	vähäinen
Rypäsmäntypistiäinen	ryhminä	harvinainen	harvalukuinen	vähäinen
Pilkkumäntypistiäinen	ryhminä	yleinen	ajoittain hyvin runsas	hyvin merkittävä



Kuva 135. Männyllä elävien hyönteisten painon riippuvuus ravinnon saasteisuudesta. Ravinnon saastuneisuus on kuvattu etäisyytenä saastutuslähteestä.

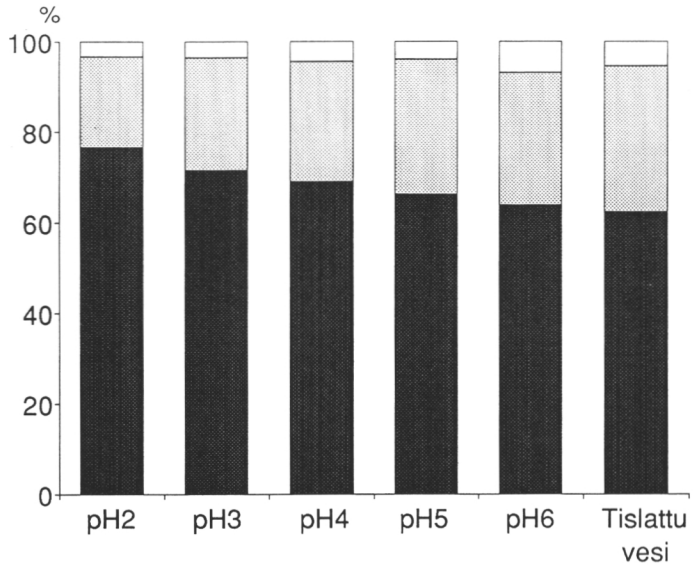
Koon muutos on yhteydessä hyönteisten kykyyn tuottaa jälkeläisiä, ja saastuneella ravinnolla ruokitut ruskomäntypistiäisnaaraat munivatkin maasto-oloissa noin 15 % vähemmän munia kuin puhtaalla ravinnolla ruokitut. Ero tasoittui kuitenkin jo ensimmäiseen toukka-asteeseen mennessä, koska pienempien eli saastuneella ravinnolla kasvatettujen naaraiden tuottamat munat olivat selvästi elinvoimaisempia ja niistä kehittyi enemmän elinkelpoisia toukkia kuin vertailunaaraiden munista. Syitä elinvoimaisuuden eroihin ei tunneta.

Saastunut ravinto vaikutti hyönteisten koon ja tuotettujen jälkeläisten määrän lisäksi myös niiden kehitysnopeuteen ja talvikuolleisuuteen. Pilkkumäntypistiäisen toukat kehittyivät saastuneella ravinnolla hitaammin ja niiden kotelot kuoriutuivat myöhemmin kuin vertailuhyönteisillä, myös niiden talvikuolleisuus oli suurempi.

Hidastunut kehitys altistaa tuhohyönteiset pedoille, loisille ja taudinaiheuttajille ja ilmeisesti lisää siten niiden kuolleisuutta merkittävästi. Hidastunut tai epäsäännöllinen kehitys voi myös haitata pistiäisten pariutumista ja niiden jälkeläisten kehittymistä etenkin pohjoisessa, jossa lyhyt kesä muutenkin rajoittaa hyönteisten elinmahdollisuuksia.

Tutkimuksissa selvitettiin myös raskasmetallien kertymistä metsätuholaisiin. Lähisukuisten mäntypistiäislajien välillä metallipitoisuuksissa todettiin huomattavia eroja. Tutkituista metalleista lähinnä kadmium rikastui neulasia syöviin hyönteisiin. Myrkyllisyytensä takia raskasmetallit voivat muuttaa myös hyönteisten välisiä runsaussuhteita.

Ilmansaasteet vaikuttivat sekä tuhohyönteisten kuolevuuteen että niiden lisääntyvyyteen. Tämä selittää eräiden tuholaisten puuttumisen saastelähteiden läheisyydestä. Ilmansaasteiden aiheuttamat muutokset männyn neulasissa vähensivät ruskomäntypistiäisen munien kuolleisuutta (kuva 136) ja voivat siten edesauttaa tuhojen syntymistä.



Kuva 136. Ruskomäntypistiäisen munien kehittyminen ensimmäisen asteen toukiksi eri käsittelyissä. Eloonjääneiden osuus on merkitty mustalla. Etelä-Suomessa sadeveden happamuus on nykyisin noin pH 4,4–5,0.

Kohtalaisesti saastuneilla alueilla tuhohyönteisten voidaan päätellä runsastuvan puiden heikentyneen vastustuskyvyn takia. Tätä tukevat myös Keski-Euroopassa tehdyt kokeelliset tutkimukset kirvojen lisääntymisestä. Kaasumaiset ilmansaasteet vaikuttavat kasvin fysiologiaan ja biokemiaan ja voivat siten edistää kirvojen lisääntymistä ja lisätä niiden populaatiotiheyttä. Moottoriteiden varsilla tehdyissä kirvojen häkkikokeissa on todettu autojen pakokaasujen lisäävän kirvojen määrää. Tämä ei johdu luontaisten vihollisten puuttumisesta. Kirvojen määrän on sen sijaan esitetty olevan yhteydessä vapaiden aminohappojen, erityisesti glutamiinin, määrään lehdissä suhteessa lehtien sokeripitoisuuteen.

Aiheesta enemmän

Jussila, I. & Jormalainen, V. 1991. Raskasmetallien ja eräiden muiden ilman epäpuhtauksien leviäminen ympäristöön Porin-Harjavallan alueella vuonna 1990. SYKE Sarja B4. Turun yliopisto. Satakunnan ympäristötutkimuskeskus. 58 s.

Nevalainen, S. & Liukkonen, K.M.H. 1988. Ilman epäpuhtauksien vaikutus bioottisiin metsätuhoihin. Kirjallisuuskatsaus. Folia Forestalia 716. 25 s.

8. Metsätuhojen taloudelliset vaikutukset

Keski-Euroopan metsätuhojen vaikutus Suomen metsäsektoriin

Kautta aikojen ovat myrskyt, metsäpalot sekä hyönteis- ja sienituhot vaurioittaneet metsiä Keski-Euroopassa. Tässä artikkelissa keskitytään kuitenkin vain ns. uudentyyppisiin metsävaurioihin ja niiden vaikutuksiin Suomen metsäsektoriin. Nämä uudentyyppiset metsävauriot ovat pääosin ihmisen toiminnallaan aikaansaamien ilmansaasteiden aiheuttamia, yleensä maantieteellisesti laajalle levinneitä ja luonteeltaan jatkuvia (kuva 137).

Arvioiden tekemisessä on käytetty apuvälineenä MESTA-tietokonemallia, joka on Suomen oloihin kehitetty versio metsätuotteiden maailmankauppamallista *Global Trade Model*. Tämä GTM-malli rakennettiin vuonna 1985 päättyneessä IIASA:n *(International Institute for Applied Systems Analysis)* laajassa kansainvälisessä Metsäsektori-projektissa.

MESTA on matemaattisista yhtälöistä rakennettu tietokonemalli. Sen avulla etsitään markkinatasapaino 16 metsätuoteryhmälle 18 maapallon osa-alueella. Kunkin viisivuotisen tarkastelujakson päätteeksi saatu tasapainoratkaisu on seuraavan jakson lähtökohta. Mallia ei ole rakennettu vain metsätuhojen vaikutusten arviointiin, vaan myös talouspoliittisten päätösten, kuten esimerkiksi tariffit, verot, energiaratkaisut jne., ja teollisuuden investointistrategioiden tutkimiseen.



Kuva 137. Keski-Euroopan metsätuhot ovat vakavimpia vuoristoalueilla. Kuva on Erzgebirgeltä Tsekkoslovakiasta, läheltä Puolan ja Saksan rajaa. Paikoitellen kuolleet puut jätetään hakkaamatta riistan suojiksi, paikoin metsän tilalla kasvaa vain heinikkoa (hapan niitty). Metsän uudistaminen näillä alueilla on ollut vaikeaa kauan. Metsää kuoli jo 1940-luvulla. Pääasiallinen syy metsäkuolemiin on ruskohiilialueiden korkea rikkikuorma yhdessä ankarien ilmasto-olojen kanssa. Valokuva: Eeva-Liisa Jukola-Sulonen.

Puhdistushakkuut tai kasvun hidastuminen

Keski-Euroopan metsätuhojen vaikutuksia Suomen metsäsektoriin arvioitiin kahden perusvaihtoehdon pohjalta:

1. Mitä tapahtuu, jos metsätuhojen aiheuttamien "puhdistushakkuiden" vuoksi havupuun tarjonta Keski-Euroopassa lisääntyy niin, että puuta tarjotaan markkinoille 1990-luvun aikana ääritapauksessa kaksinkertainen määrä verrattuna kehitykseen, jossa metsätuhoja ei ole.
2. Mitä tapahtuu, jos saastuminen hidastaa Keski-Euroopan havumetsien kasvua 1980-luvun puolivälistä lähtien tasaisesti ja kasvu putoaa ääritapauksessa vuoteen 2010 mennessä puoleen verrattuna kehitykseen, jossa ympäristön pilaantuminen ei vaikuta kasvuun.

Vaihtoehto 1 on ulkoinen uhka Suomen metsäsektorille, vaihtoehto 2 sen sijaan mahdollisuus. Näitä vaihtoehtoja muunneltiin siten, että lopulliset kehitysvaihtoehdot koostuivat erilaisista metsien kasvun ja kuolleisuuden yhdistelmistä. Ilmansaasteiden aiheuttamien muutosten osoittamiseksi eri kehitysvaihtoehtoja verrattiin ns. perusvaihtoehtoon, jossa ilmansaasteista johtuvia metsävaurioita ei esiinny. Metsävaurioiden oletettiin vaikuttavan vain havupuiden tarjontaan ja vain Länsi-Euroopassa, johon ei luettu Suomea ja Ruotsia.

Taulukko 17. Alueittaiset muutokset hakkuissa ja metsäteollisuuden tuotannossa vuonna 2000 verrattuna 1980-luvun lopun tilanteeseen, jos Länsi-Euroopassa puun tarjonta kaksinkertaistuu puhdistushakkuiden vuoksi, mutta ilmansaasteet eivät vaikuta metsien kasvuun.

Alue	Havupuun hakkuut, milj. m^3	Havusahatavaran tuotanto, milj. m^3	Paperin ja kartongin tuotanto, milj. tonnia
Länsi-Eurooppa	+12,7	+1,2	+3,6
Suomi	−1,0	+0,2	−0,3
Ruotsi	−0,9	−0,2	−0,7
Pohjois-Amerikka	−4,9	−2,2	−2,3
Etelä-Amerikka	−1,5	+0,1	−0,2
Muu maailma	−0,5	+2,6	−0,1

Vaikutukset oletettuja pienempiä

Vaihtoehtojen analysointi osoitti yleisen käsityksen vastaisesti, että Keski-Euroopan metsäkuolemat eivät aiheuttaisikaan voimakkaita muutoksia Suomen metsäsektorissa. Jyrkkiä muutoksia olisi odotettavissa vain, jos metsäkuolemat Euroopassa olisivat äkillisiä ja laajoja tai jos hakkuita pystyttäisiin olennaisesti lisäämään esimerkiksi metsäpoliittisin toimin. Sekä kuolleisuuden lisääntyminen että puuston kasvun hidastuminen vaikuttaisivat hakkuisiin Suomessa hyvin vähän. Vielä lievempinä vaikutukset näkyisivät metsäteollisuuden tuotannossa ja erityisen vähän paperin ja kartongin tuotannossa.

Länsi-Euroopan mahdollisten metsätuhojen ennakoitua pienempiin taloudellisiin vaikutuksiin on useita syitä. Puhdistushakkuut korvaavat suurelta osalta normaalit hakkuut, joten hakkuut lisääntyvät kaikkiaan vain vähän. Metsäsektori kokonaisuutena reagoi hitaasti, ja tämä sektorille ominainen jäykkyys lieventää puun tarjonnan muutosten vaikutuksia. Lisäksi vaikutukset leviävät metsätuotteiden kansainvälisten markkinoiden välityksellä myös muihin maanosiin tasoittaen kokonaiskehitystä. Tämä käy hyvin ilmi taulukosta 17, jossa on tarkasteltu yhden kehitysvaihtoehdon maailmanlaajuisia vaikutuksia. Taulukon lukuja ei pidä tulkita ennusteeksi, vaan esimerkeiksi siitä, millaisia kehityskokeiluja mallilla voidaan tehdä.

Epävarmuustekijöitä

Malli on parhaimmillaankin vain yksinkertaistettu kuva todellisuudesta, ja monia malleissa käytettyjä oletuksia voidaankin asettaa kyseenalaiseksi. Lisäksi muiden tekijöiden rinnakkais- ja yhteisvaikutuksia metsätuhojen kanssa ei ole toistaiseksi ehditty perusteellisesti arvioida. Usean tekijän yhteisvaikutus saattaa laukaista katastrofin. Mallikokeissa on myös voitu todeta, että esimerkiksi ener-

giapoliittiset ratkaisut vaikuttavat Suomen metsäsektoriin voimakkaammin kuin Keski-Euroopan mahdolliset metsätuhot.

Epävarmuutta aiheuttaa myös se, että puhdistushakkuiden todellista määrää on vaikea ennakoida. Syitä on lukuisia. Ensiksikin olisi tiedettävä metsien todellinen tuhoaste ja myös tulevien saastelaskeumien määrä. Toiseksi saastelaskeumien ja metsätuhojen alueellinen sijainti pitäisi pystyä ennakoimaan puhdistushakkuiden todellisten kustannusten arvioimiseksi. Kolmanneksi metsien omistussuhteet ja tuleva hakkuukäyttäytyminen vaikuttavat puhdistushakkuiden organisointiin.

Suomen metsätuhojen taloudelliset vaikutukset

Luotettavaa tutkimustietoa Suomen omien metsätuhojen vaikutuksista Suomen metsäsektoriin ei ole toistaiseksi olemassa. Eräiden mallikokeiden perusteella voidaan kuitenkin tehdä alustavia johtopäätöksiä.

Lähtökohtana tuhojen vaikutusten arvioinnille on, että toteutuneet hakkuut ovat Suomessa jo pitkään olleet noin neljänneksen pienemmät kuin hakkuumahdollisuudet. Tämän kehityksen oletetaan jatkuvan, jolloin metsätuhoista mahdollisesti aiheutuva puuston kasvun supistuminen merkitsee tiettyyn rajaan asti lähinnä vain hakkuusäästöjen pienenemistä. Ilmansaasteista johtuvien metsätuhojen aiheuttama, tai yhtä lailla puuston yli-ikäisyydestä seuraava puiden kuoleminen ja jo sen uhka merkitsevät kuitenkin osittaista siirtymistä puhdistushakkuisiin. Jos puhdistushakkuiden määrä ei ole kovin suuri, ne voidaan hoitaa pääosin vain hakkuujärjestystä muuttamalla. Suomen kehittyneissä puunhankinnan oloissa vaikutukset kokonaishakkuisiin olisivat tällöin vähäiset.

Alustavissa mallikokeissa saatiin tulokseksi, että verraten voimakaskin (keskimäärin yksi prosentti vuodessa) metsätuhoista johtuva puuston kasvun aleneminen supistaisi hakkuumääriä vasta vuoden 2020 jälkeen. Vain katastrofaalisella kasvun alenemisella olisi selvä vaikutus metsätalouteen ennen vuotta 2000. Voimakkaasti lisääntyvä puiden kuolleisuus saisi tällöin aikaan sen, että puhdistushakkuita olisi enää vaikea sopeuttaa muuhun hakkuutoimintaan.

Aiheesta enemmän

Seppälä H., Seppälä R. & Kallio M. 1990. Economic impacts of Western European air pollution on the Finnish forest sector. Teoksessa: Kauppi P., Anttila P. & Kenttämies K. (toim.): Acidification in Finland. Springer-Verlag, s. 1217–1237.

9. Yhteenveto ja päätelmiä

Metsäluonto ja ilmansaasteet — Suomen metsien terveydentila

Keski-Euroopassa todettiin 1970-luvulla paikoitellen selvää metsien kunnon heikentymistä. Huoli metsien terveydentilasta heräsi myös Suomessa, ja metsien kunnon seuranta aloitettiinkin happamoitumistutkimusprojektin (HAPRO) perustamisen myötä vuonna 1985. Tähän liittyen käynnistyi Metsäntutkimuslaitoksessa ILME-projekti *(Ilman epäpuhtauksien vaikutukset metsiin)*. Myös monien muiden tutkimusten yhteydessä on saatu tietoa Suomen metsissä tapahtuneista muutoksista. Tällaisia tutkimusaineistoja ovat mm. valtakunnan metsien inventoinnin metsävaratiedot, karikeaineistot, kasvillisuustiedot ja lannoituskokeet.

1. Metsikkösadanta ja ainekierrot

Metsiköiden ravinnetaseita tarkastelemalla tutkitaan ilmansaasteiden aiheuttamia muutoksia ekosysteemin ravinnekierrossa. Metsikön latvuskerros pidättää puulajista riippuen yleensä 15–30 % kokonaissadannasta ja muuttaa samalla huomattavasti laskeuman laatua. Lehtipuiden latvukset vähentävät hiukan sadeveden happamuutta. Havumetsässä sadeveden happamuus puolestaan lisääntyy sen kulkeutuessa latvuston läpi, koska havupuiden neulasistoon kerääntyy huomattavasti enemmän kuivalaskeumaa kuin lehtipuiden lehdille.

Etelä-Suomessa puiden latvustoista huuhtoutuu huomattavasti vähemmän emäsravinteita kuin Keski-Euroopan metsävaurioalueilla. Suomessa huomattava osa typpi-

laskeumasta voi pidättyä latvustoon, kun taas Keski-Euroopan typpikuormitetuilla alueilla latvukset eivät sido typpeä. Mittaustulosten mukaan häiriintymättömissä metsäekosysteemeissä typpilaskeuma sitoutuu varsin tarkoin metsikön biomassatuotokseen ja typpeä huuhtoutuu hyvin vähän. Poikkeuksena ovat paikallisten päästölähteiden, esim. turkistarhojen, lähiympäristöt, joissa typpikuorma on suuri ja typpi on eri muodoissa kuin tausta-alueilla.

Maaveden laadun selvitykset viittaavat siihen, että maaperän ravinteista magnesiumin huuhtoutumisriski olisi suurin. Sen sijaan neulasten magnesiumpitoisuudet ovat yleensä olleet tyydyttäviä.

2. Maaperän happamoituminen

Maan happamoituminen johtuu luonnon omista prosesseista ja ihmisen aiheuttamista muutoksista. Ilmansaasteiden lisäksi myös mm. metsien aiempi käyttö vaikuttaa happamoitumiskehitykseen. Vielä ei pystytä arvioimaan happaman laskeuman osuutta maaperän happamoitumisessa.

Humuksen määrä ja ominaisuudet kuvaavat maan viljavuutta. Tutkimustulosten mukaan humus oli vähiten hapanta Etelä- ja Itä-Suomessa ja happaminta Länsi- ja Pohjois-Suomessa. Kivennäismaakerrosten happamuus ei vaihdellut alueellisesti yhtä selvästi. Kivennäismaan pintaosa näyttää kuitenkin olevan Etelä-Suomessa happamampaa kuin Pohjois-Suomessa.

Etelä-Suomen metsämaat ovat nykyään vain kohtalaisesti happamoituneita, joskin noin 10 %:ssa pintamaanäytteistä maan puskurikyky oli heikentynyt. Maaperän happamoitumisessa ei havaittu alueellista säännönmukaisuutta eikä se vastannut happaman laskeuman alueellisuutta.

Maan happamoituminen voi lisätä liukoisen alumiinin määrää ja häiritä juurten toimintaa. Humuskerroksessa alumiinin haitallisen runsas liukeneminen on hyvin epätodennäköistä nykyisellä saastekuormituksella. Maan happamuuden lisääntyessä alumiinia saattaa liueta myös kivennäismaan huuhtoutumiskerroksesta. Huuhtoutumiskerroksesta liuennutta alumiinia kulkeutuu rikastumiskerrokseen, joka on vähemmän hapanta, ja alumiinia saostuu uudelleen. Mittauksissa ei kuitenkaan ole toistaiseksi todettu poikkeuksellisen korkeita maaveden alumiinipitoisuuksia.

Suomessa on muutamia, suhteellisen pieniä raskasmetallien saastuttamia alueita, kuten Harjavallan, Raahen ja Tornion seudut. Näitä lukuunottamatta Etelä-Suomen kangasmaat ovat keskimäärin melko vähän raskasmetallien saastuttamia.

Metsämaiden uuttuva rikki on sitoutunut enimmäkseen maan orgaaniseen aineeseen, joten sitä on eniten humuskerroksessa. Kivennäismaassa sitä on suhteellisesti eniten rikastumiskerroksessa alumiini- ja rautayhdistei-

nä. Rikkiä on yleensä eniten viljavilla kasvupaikoilla. Kuusikoissa maassa on puolestaan tavallisesti enemmän rikkiä kuin männiköissä. Humuksen rikkipitoisuuden ja rikkilaskeuman välillä ei ole todettu selvää yhteyttä.

Happamoitumiselle herkimmiksi on arvioitu karut harjualueet ja kalliomaat, joilla on ohut maapeite. Tällaisia maita ovat mm. Salpausselät sekä Hämeenkangas ja Pohjankangas.

Turvemailla, joiden osuus Suomen maa-alasta on noin kolmannes, ei happamoitumishaittoja ilmeisesti ole odotettavissa. Kuitenkin turvemaat keräävät ja varastoivat tehokkaasti mm. laskeuman rikkiä. Pohjaveden korkeuden vaihtelun takia rikkiä saattaa huuhtoutua vesistöihin, joissa se voi aiheuttaa happamoitumista.

3. Ainekertymät jäkälissä ja sammalissa

Jäkälät ja sammalet ottavat tarvitsemansa veden ja ravinteet ilmasta ja keräävät siten tehokkaasti myös saastelaskeumaa. Laskeuman alueellista jakautumista maassamme selvitettiin puilla kasvavan sormipaisukarvejäkälän avulla. Sormipaisukarvejäkälässä oli eniten rikkiä ja typpeä Etelä-Suomessa, mikä vastaa malleihin perustuvien laskeuma-arvioiden alueellisuutta. Sen sijaan raskasmetalleja oli eniten Harjavallan, Tornion, Raahen ja Outokummun ympäristöissä sekä Kuolan vastaisella rajalla Itä-Lapissa. Sammalten raskasmetallipitoisuuksien alueellisuus oli hyvin samankaltainen kuin sormipaisukarvejäkälän.

Maassa kasvavien sammalten alkuainepitoisuuksia selvitettiin vuosina 1985 ja 1990 pohjoismaisessa yhteistutkimuksessa. Verrattaessa vuoden 1990 mittaustuloksia vastaaviin aiempiin tutkimuksiin, voidaan todeta, että useimpien tutkittujen raskasmetallien pitoisuudet ovat laskeneet.

4. Kasvilajiston muutokset

Ilmansaasteiden vaikutukset näkyvät usein muissa metsäluonnon osissa ennen niiden näkymistä puissa. Yleisimmin käytettyjä ilmansaasteindikaattoreita ovat puiden oksilla ja rungolla kasvavat jäkälät ja viherlevät. Niistä tunnetaan ilmansaasteille hyvin herkkiä (naavat ja lupot), jokseenkin kestäviä (sormipaisukarve) ja kestäviä (viherkuprujäkälä ja viherlevät) lajeja.

Valtakunnallinen kartoitus osoitti, että naavoja ja luppoja on Etelä-Suomessa vain vähän, mutta ne runsastuvat pohjoiseen siirryttäessä. Sormipaisukarve- ja viherkuprujäkälä sekä viherlevät kasvoivat runsaina alueilla, joilta naavat ja lupot puuttuivat.

Vanhojen aineistojen perusteella naavoja ja luppoja on

ollut maan eteläosissa runsaasti vielä 1950-luvulla. Tämän jälkeen tapahtunut väheneminen johtunee ilmansaasteista, erityisesti rikistä. Tätä käsitystä tukee myös jäkälälajien runsauden ja esiintymisen perusteella lasketun ilmanpuhtausindeksin (IAP) alueellisuus. IAP-kartta osoittaa, että lajeja on vähän ja herkät jäkälälajit ovat harvinaisia alueilla, joilla mallilaskelmien mukainen rikkilaskeuma on suuri.

Yksisoluiset levät voivat reagoida ympäristömuutoksiin nopeammin kuin kehittyneemmät kasvit, esimerkiksi puut. Etelä- ja Keski-Suomessa on löytynyt viime vuosina runsaasti puita, joiden neulasilla kasvaa leväpeitettä. Runsaan leväkasvuston tiedetään ilmentävän korkeaa typpilaskeumaa ainakin Etelä-Skandinaviassa. Viime vuosien leutojen ja kosteiden syksyjen epäillään myös lisänneen levän esiintymistä.

5. Neulasten väriviat ja soluvauriot

Yleisimpiä neulasten värioireita olivat oksien yläpinnan neulasten keltakärkisyys ja neulasten valonpuoleisten osien haalistuminen ja ruskettuminen. Oksien yläpinnan kellastumisoireita havaittiin paikoitellen koko Suomessa, eniten Etelä- ja Keski-Suomessa. Värioireet voivat johtua neulasten valoherkkyyden lisääntymisestä tai liittyä ravinnetalouden häiriöihin, korkeisiin otsonipitoisuuksiin tai poikkeuksellisiin sääoloihin. — Soluanatomisissa tutkimuksissa eri puolilta Suomea kerätyissä neulasnäytteissä todettiin soluvaurioita.

6. Havupuiden harsuuntuneisuus

Harsuuntuminen eli neulaskato ilmentää puiden yleistä kuntoa. Harsuuntuminen voi johtua puiden ikääntymisestä, kasvupaikan ominaisuuksista, ilmastosta tai säistä sekä ihmisen toiminnasta, esimerkiksi ilmansaasteista. Metsien harsuuntuneisuuden on todettu lisääntyvän mm. siirryttäessä etelästä pohjoiseen sekä metsien ikääntyessä.

Harsuuntuneisuuden muutoksia seurattiin vuosittain. Koko tutkimusjakson 1986–89 aikana puiden keskimääräinen harsuuntuneisuusaste lisääntyi lievästi. Harsuuntuneimmat metsät sijaitsivat Lapissa, Kainuussa ja Pohjanmaalla. Alueelliset harsuuntuneisuuden muutokset eivät kuitenkaan olleet vuodesta toiseen samanlaisia; samallakin alueella harsuuntuneisuus saattoi jonain vuonna lisääntyä, seuraavana vähentyä.

Harsuuntuneisuuden ja ilmansaastekuorman alueellisuuden välillä ei havaittu selvää yhdenmukaisuutta tarkasteltaessa koko Suomen tutkimustuloksia. Kun Etelä-Suomea ja Pohjois-Suomea tutkittiin erikseen, löydettiin rikkilaskeuman ja männyn keskimääräisen harsuuntumis-

asteen väliltä lievää yhteisvaihtelua maan eteläpuoliskossa. Kuormitetuimmassa Etelä-Suomessa ilmansaasteet voivat olla osasyynä harsuuntumisen lisääntymiseen, sillä harsuuntuneimmat alle 80-vuotiaat metsät sijaitsevat tällä alueella. Paikallisesti, esimerkiksi pistelähteiden ympäristössä, saastelaskeuma saattaa olla tärkeimpiä harsuuntumisen syitä.

Suomen metsien harsuuntuneisuus on Keski-Euroopan maiden keskitasoa. Metsät ovat yhtä harsuuntuneita kuin muissa Pohjoismaissa, mutta vähemmän harsuuntuneita kuin esimerkiksi Tsekkoslovakiassa. Koska harsuuntuneisuutta on seurattu vasta viiden vuoden ajan, pitkän ajan muutoksista ei ole tietoa. Esimerkiksi luontaista neulasmassan vaihtelun suuruutta ei tarkoin tunneta. Suomessa havaittu harsuuntumisen lisääntyminen saattaakin olla normaalia vuosivaihtelua. Neulaskarikeaikasarjojen ja neulasten johtojännetutkimusten mukaan puiden neulasmassa on vaihdellut voimakkaasti aikaisemminkin.

7. Sieni-, hyönteis- ja abioottiset tuhot

Bioottiset ja abioottiset tuhot aiheuttavat vaihtelua metsien yleisessä terveydentilassa. Tuhoja esiintyi koko maassa noin puolessa tutkituista metsiköistä ja kolmasosassa koepuista.

Mitä harsuuntuneempia puut olivat, sitä enemmän niissä havaittiin abioottisia ja bioottisia tuhoja. Nämä tuhot heikensivät osaltaan puiden kuntoa, mutta useimmiten ne eivät olleet vakavan harsuuntuneisuuden tärkein syy. Vain joka kymmenennessä tapauksessa tuhot lisäsivät suoraan harsuuntuneisuutta. Maastoselvityksissä ei voitu osoittaa sieni- tai eläinlajeja, jotka olisivat selvästi hyötyneet puiden heikentymisestä.

Bioottiset ja abioottiset tuhot eivät yleensä olleet puiden elinvoiman heikkenemisen tärkein syy yksittäisiä koealoja lukuunottamatta. Poikkeuksen muodosti kuitenkin männynversosurma, jonka epidemia lisäsi männyn harsuuntumista Länsi-Suomessa vuonna 1988. Toistaiseksi ei ole pystytty osoittamaan tautia aiheuttavan surmakkasienen hyötyvän ilmansaasteista.

Teollisuuslaitosten läheisyydessä, esimerkiksi Harjavallassa, useimpia tuhohyönteisiä oli poikkeuksellisen paljon kohtalaisesti saastuneella alueella, jolla puiden vastustuskyky oli heikentynyt. Pahiten saastuneella alueella aivan tehtaiden tuntumassa useimpia tuholaisia oli hyvin vähän, vain kirvoja ja kaarnakuoriaisia oli sielläkin runsaasti. Normaaleissa luonnonoloissa kaukana tehtaista useimpia tuholaisia on suhteellisen vähän ja ne aiheuttavat vain paikallisia tuhoja.

8. Puiden kasvu

Metsien puuvaranto ja kasvu ovat lisääntyneet selvästi viime vuosikymmeninä. Vuonna 1990 Suomen metsissä oli puuta noin 1880 milj. m^3 ja metsien vuotuinen kasvu oli lähes 80 milj. m^3. Vuotuiset hakkuut ovat 1980-luvulla olleet 50–60 milj. m^3, eli selvästi kasvua pienemmät. Metsien uudistaminen, soiden ojittaminen, taimikoiden hoito, metsien puuston tihentyminen ja lannoitus ovat lisänneet metsien kasvua. Ilmakehän kohonneen hiilidioksidipitoisuuden ja typpilaskeuman uskotaan myös osaltaan lisänneen kasvua.

Yksittäisen puun kasvu vaihtelee voimakkaasti vuodesta toiseen. Eniten vaihtelua aiheuttavat säätekijät, käpysadon määrä sekä erilaiset tuhot, joista männynversosurma on ollut vakavin. Harsuuntumisen on todettu vähentävän puukohtaista kasvua. Valtakunnallisesti puiden kasvussa ei kuitenkaan ole havaittu trendinomaista muutosta viime vuosikymmenien aikana.

Päätelmiä

Suomen metsien terveydentila voidaan tiivistää seuraavasti:

— Metsäpuiden elinympäristö on muuttunut. Muutosta kuvaavat mm. saasteille herkkien jäkälälajien väheneminen ja saasteita hyvin kestävien lajien yleistyminen.
— Neulasten pinnalla kasvaa melko yleisesti viherlevää. Se ilmentää typpilaskeumaa, mutta voi johtua myös leudoista, leväkasvua suosineista syksyistä.
— Puiden latvuksissa on todettu värioireita, kuten oksien yläpinnan neulasten keltakärkisyyttä ja neulasten valonpuoleisten osien haalistumista ja ruskettumista. Ennen näkyviä oireita neulasissa voidaan havaita soluvaurioita.
— Harsuuntuneisuus lisääntyi tutkimusjakson aikana eniten vanhoissa metsissä, mutta myös Etelä-Suomen nuorissa metsissä, joissa ilmansaasteet saattavat olla osasyynä.
— Harsuuntuneisuuden pitkäaikaisia muutoksia ja luontaista vaihtelua ei toistaiseksi tunneta.
— Puiden kasvussa ei ole havaittu selvää trendinomaista muutosta viime vuosikymmenien aikana.
— Metsikön latvuskerros muuttaa huomattavasti laskeuman laatua. Latvuskerros sitoo laskeuman typpeä, ja sadeveden mukana latvuksesta huuhtoutuu mm. rikkiä ja emäskationeja.
— Suomessa todettu hapan laskeuma ei yltäne sille tasolle, jossa metsämaan alumiinia alkaa liueta puille haitallisessa määrin. Maavedessä ei ole todettu metsäpuille myrkyllisiä alumiinipitoisuuksia. Näyttää epätodennäköiseltä, että maaperän alumiini uhkaisi metsien terveyttä.

— Maaperän suuret raskasmetallipitoisuudet ovat yleensä paikallisia ja johtuvat lähinnä geologisista poikkeavuuksista tai pistemäisistä saastelähteistä.
— Metsämaan happamuuden ja happaman laskeuman välillä ei näyttänyt olevan yhteyttä. Suomen metsämaat ovat keskimäärin vain kohtalaisesti happamoituneita. Etelä-Suomen kangasmaiden puskurikyky happamoitumista vastaan on kuitenkin heikko. Kangasmaiden happamoitumista voidaan lieventää ja maan viljavuutta pitää yllä maan- ja metsänhoidollisin keinoin.

Ilmansaasteiden vaikutukset metsien kuntoon kytkeytyvät mm. sääoloihin, tauteihin, puiden ikään ja metsien käsittelyyn. Näiden väliset vuorovaikutukset ovat vielä suurelta osin tuntemattomia. Suomen pohjoisen sijainnin vuoksi luontomme on erityisen herkkä ylimääräiselle stressille. Rikkilaskeuma ylittää lähes koko maassa metsälle haitallisena pidetyn ns. kriittisen rajan. Myös typpilaskeuma on maan eteläisissä osissa lähellä kriittistä rajaa.

Sadeveden ja pienten pintavesien happamoituminen sekä pohjavesien sulfaattipitoisuuksien nousu kertovat ympäristön hitaasta muuttumisesta, joka vaikuttaa myös metsäekosysteemiin. Ainoa keino välttää vakavien metsävaurioiden riski Suomessa on vähentää ilmansaastepäästöjä niin, että luonnon kestokyvyn kannalta kriittiset saastepitoisuudet eivät ylity.

Liite 1.

Aineiston keruu

Koealaotokset

Vuonna 1985 aloitetussa valtakunnan metsien 8. inventoinnissa (VMI8) perustettiin tilapäisten kertainventoinnin koealojen ohella pysyviä koealoja. Niillä voidaan seurata metsissä tapahtuvia muutoksia määräajoin toistuvien mittausten avulla. ILME-projektissa käytetyt koealaotokset muodostavat systemaattisen, koko maan kattavan koealaverkon (kuva 138).

VMI:n koealojen lisäksi ILME-projektissa käytettiin muiltakin koealoilta kerättyjä tietoja. Esimerkkinä pitkäaikaisesta tutkimusaineiston keruusta ovat 1950- ja 1960-luvuilta lähtien toiminnassa olleet karikekoealat. Erityistarpeita varten perustettiin lisäksi koealoja esimerkiksi päästölähteiden ympäristövaikutusten selvittämiseksi.

Kertainventoinnin koealat

Ensimmäinen valtakunnan metsien inventointi aloitettiin vuonna 1921. Neljä ensimmäistä valtakunnan metsien inventointia tehtiin ns. linja-arviointina, jossa metsämaat inventoitiin läpi maan lounaasta koilliseen kulkevilta linjoilta. Vuodesta 1964 lähtien on käytetty systemaattista ryväsotantaa, jossa inventointi etenee metsälautakunnittain. Koko Suomen metsien inventointi kestää yleensä 6–10 vuotta. Nykyinen, valtakunnan metsien 8. inventointi aloitettiin vuonna 1986 Etelä-Karjalan ja Helsingin metsälautakunnista ja se päättyy Lappiin.

Laskennallisen päivityksen tuloksena voidaan jo nyt saada puuston tilavuus- ja kasvuarviot vuosittain koko maasta. VMI:n kehitystyössä on tavoitteena laajentaa metsävaratietojen vuosittaista seurantaa liittämällä käytössä oleva satelliittikuvatieto ajantasaistukseen.



VMI kertainventoinnin koealat 1986–89 (25 772 kpl) — koko maa noin 65 000 kpl



Pysyvät koealat 1985–86 (3009 kpl)

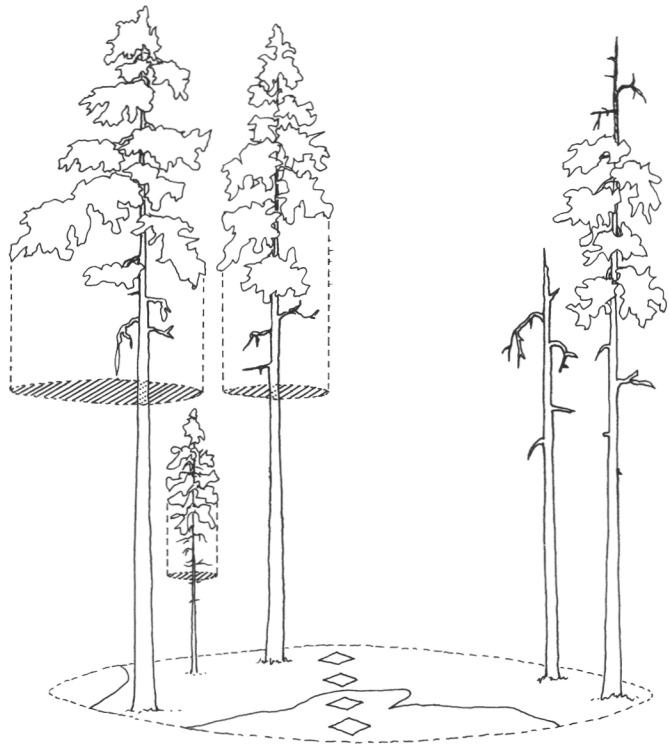


Ekstensiivikoealat 1986–89 (600 kpl)



Intensiivikoealat 1986–89 (100 kpl)

Kuva 138. Metsien terveydentilan seurantajärjestelmä. Intensiivikoealoilla selvitetään mm. ilmansaasteiden vaikutusmekanismeja ja syy-seuraussuhteita. Koealojen määrän kasvaessa ja koealaverkon laajetessa koskemaan koko Suomea tulosten yleistettävyys kasvaa. Eniten koealoja on VMI:n kertainventoinnissa, mutta tiedot saadaan vuosittain vain osasta Suomea.

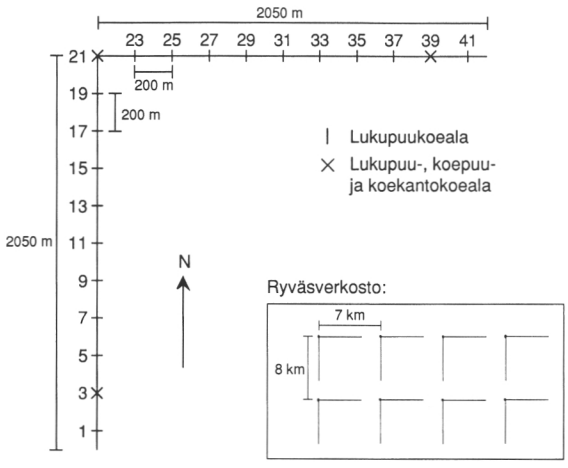


Kuva 139. Kaavio VMI8:n pysyvästä koealasta ja sillä tehtävistä mittauksista. Ympyräkoealan säde on 9,77 m ja koko 300 m^2. Tarvittavat näytteet kerättiin koealaa vahingoittamatta, pääsääntöisesti sen ulkopuolelta. Maantutkimuksiin tarvittavat näytteet kerättiin koealaa ympäröivältä, 300 m^2:n kokoiselta vaippa-alueelta. Piirros: Hannu Nousiainen.

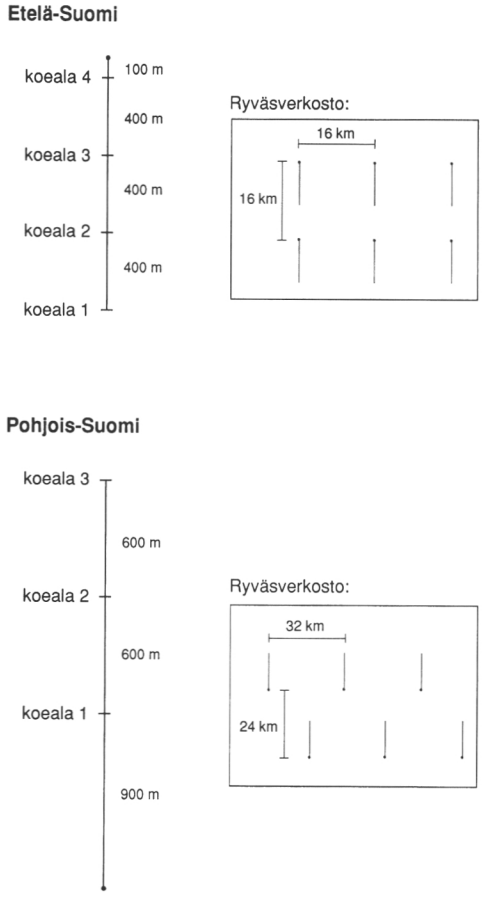
Pysyvät koealat

Koko maan kattavat pysyvät koealat (kuvat 138 ja 139) perustettiin VMI8:n alussa vuosina 1985–86 tuottamaan tietoa metsissä tapahtuvista muutoksista. Kaikkien pysyvien koealojen mittaus toistetaan 5–10 vuoden välein. Tämän koealaverkon avulla seurataan metsissä pitkän ajan kuluessa tapahtuvia muutoksia. Tätäkin tiiviimpää seurantaa varten pysyvät koealat on jaettu vielä ns. ekstensiivi- ja intensiivikoealoihin.

Ekstensiivikoealat valittiin vuotuista seurantaa varten koealarypäiden ensimmäisistä koealoista (kuva 140). Intensiivikoealat, joilla tehdään ekstensiivikoealoja tiheämmin toistuvia mittauksia, valittiin kunkin erityistutkimuksen tarpeita silmällä pitäen.



a. Kuvan mukaista kertainventoinnin koealaryvästä on käytetty maan eteläisimpään osaan vuosina 1986–89 keskittyneessä inventoinnissa. Etelä-Suomen ryväsverkossa vastinpisteiden välinen etäisyys on länsi-itäsuunnassa 7 km ja etelä-pohjoissuunnassa 8 km. Inventoinnin tilavuus- ja kasvutiedot mitataan koealoilta ja kuviohavainnot tehdään kuvioilta, joihin koealat sattuvat. Kertainventoinnissa mitataan Etelä-Suomessa noin 43 000 koealaa.



b. VMI:n pysyvien koealojen ryväs. Koealaryväs muodostaa etelä-pohjoissuuntaisen linjan. Ryväsverkoston vastinpisteet ovat pääilmansuunnissa 16 km:n etäisyydellä toisistaan, lukuunottamatta Pohjois-Suomea, jossa koealaverkko on harvempi. Jokaiseen pysyvien koealojen rypääseen kuuluu Etelä-Suomessa neljä ja Pohjois-Suomessa kolme koealaa. Etelä-Suomessa koealoja on pinta-alayksikköä kohden nelinkertaisesti Pohjois-Suomeen verrattuna. VMI8:n pysyviä koealoja on yhteensä 3009.

Kuva 140. a ja b. VMI8:ssa käytetty kertakoealojen ja pysyvien koealojen järjestelmä.

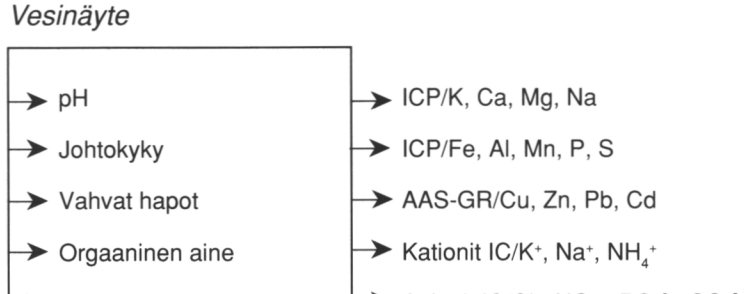
Liite 2.

Laboratorion analyysimenetelmistä

Vesinäytteet

ILME-projektin tutkimuksissa mitattiin sade- ja maavesiä. Vesinäytteistä määritettiin pH, johtokyky ja vahvat hapot sekä ravinteita ja raskasmetalleja.

Vesinäytteet tutkittiin alla olevan kaavion mukaan. Tutkittavien aineiden pitoisuudet vaihtelevat eri näytetyypeissä ja sen vuoksi samaa ionia tai alkuainetta voidaan mitata eri laitteilla niiden sopivalla mittausalueella. Sadevedet sisältävät yleensä pieniä pitoisuuksia, kun taas esimerkiksi suovedet suuria pitoisuuksia.



Selitykset: ICP = plasmaemissiospektrometri
IC = ionikromatografi
AAS-GR = atomiabsorptio-grafiittiuunilaite

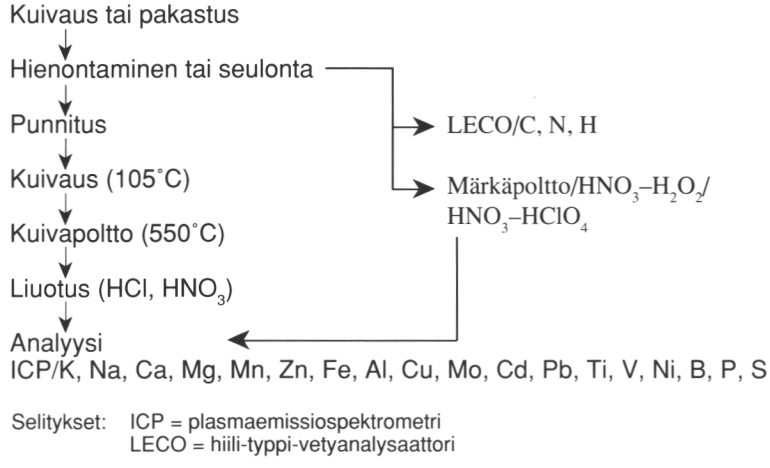
Kasvi- ja maanäytteistä määritettiin laboratoriossa kokonais- ja hivenravinteet plasmaemissiospektrometrillä (ICP). Määrittämistä varten näytteet on ensin saatettava liuosmuotoon, johon ne saadaan joko kuiva- tai märkäpoltolla.

Kuivapoltossa näytteet poltetaan hitaasti uunissa 550°C:ssa tuhkaksi, joka liuotetaan suolahappoon. Liuoksista voidaan määrittää fosfori, kalium, kalsium, magnesium, mangaani, sinkki, rauta, alumiini, kupari ja molybdeeni. Boorin määrityksissä käytetään typpihappoa.

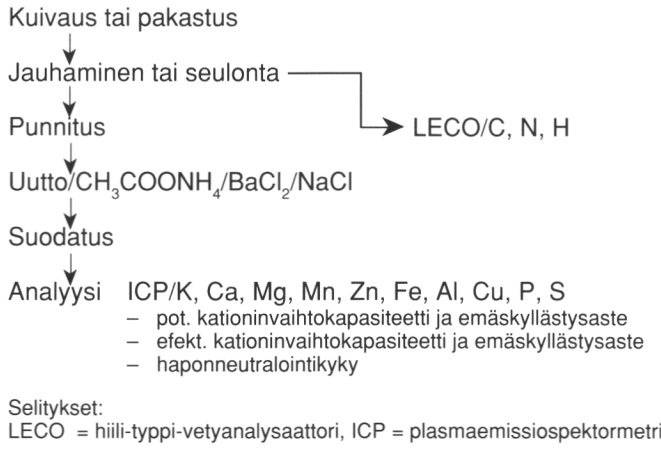
Märkäpolttomenetelmässä näytteet kuumennetaan hitaasti happoliuoksessa, kunnes ne hajoavat. Märkäpoltossa voidaan käyttää useita happoseoksia. Pelkkä typpihappo tai typpihappo/vetyperoksidiseos riittää hajottamaan neulaset, mutta humuksille, jäkälille ja sammalille tarvitaan tehokkaampi happoseos, jona on käytetty typpihappo/perkloorihapposeosta. Näistä liuoksista voidaan määrittää edellä mainittujen alkuaineiden lisäksi titaani, vanadiini, lyijy, kadmium, nikkeli ja rikki.

Kaliumia ei voida tutkia perkloorihapposeoksesta, jos sitä on paljon näytteessä, koska kalium voi saostua kaliumperkloraattina. Samoin on eroja raudan, mangaanin ja alumiinin pitoisuuksissa, koska heikommat hapot eivät pysty niitä kaikista luonnossa esiintyvistä muodoista liuottamaan. Pelkkä typpihappoliuotus ei anna samoja rauta-, alumiini- ja mangaanipitoisuuksia kuin kuivapoltolla määritetyt kokonaispitoisuudet. Kasvi- ja maanäytteet tutkitaan alla ja seuraavalla sivulla olevien kaavioiden mukaan.

Kasvi- (neulas, lehti) ja maanäyte (turve, humus)



Selitykset: ICP = plasmaemissiospektrometri
LECO = hiili-typpi-vetyanalysaattori



Selitykset:
LECO = hiili-typpi-vetyanalysaattori, ICP = plasmaemissiospektormetri

Vaihtuvat kationit, rikki ja fosfori (Maanäytteiden uuttuvat alkuaineet)

Maanäytteistä on mitattu pH ja määritetty helposti liukenevat ravinteet erilaisista uuttoliuoksista. Näytettä ravistellaan uuttoliuoksessa ja seos suodatetaan.

Suodoksista ravinteet määritetään plasmaemissiospektrometrillä. Potentiaaliset kationinvaihtokapasiteetti ja emäskyllästysaste saadaan 1 M ammoniumasetaattiliuoksella, jonka pH on 7. Vastaavasti efektiiviset kationinvaihtokapasiteetti ja emäskyllästysaste määritetään 0,1 M bariumkloridiliuoksella.

Vaihtuvat kationit ja liukeneva fosfori määritetään ammoniumasetaattiliuoksella, jonka pH on 4,65. Maan kykyä neutraloida happoa on määritetty 0,01 M natriumkloridiuutteilla, joihin on lisätty rikkihappoa.

pH

pH on liuoksen happamuuden tai emäksisyyden mitta. Se voidaan mitata jo näytteenoton yhteydessä kentällä tai laboratoriossa. pH-asteikko on 0–14 pH-yksikköä. Kun pH on 7, puhutaan neutraalista liuoksesta. Sitä suuremmat luvut osoittavat liuoksen olevan emäksisen ja pienemmät taas happaman. Luonnonvedet ovat yleensä hiukan happamia pH:n vaihdellessa 4:stä 7:ään.

Johtokyky

Johtokyky ilmaisee liuoksessa olevien ionien määrää ja se saadaan mitattua johtokykymittarilla joko maastossa tai laboratoriossa. Puhtaiden vesien johtokyky on pieni ja ionimäärän kasvaessa sekin kasvaa.

Vahvat hapot

Vahvat hapot (HNO_3, H_2SO_4, HCl) on määritetty sadevesistä titraamalla sykloheksyyliamiinilla typpikaasun täyttämässä tilassa.

Ionikromatografia

Ionien määrittämiseen voidaan käyttää kahta laitetta: ionikromatografia tai FIA-vesianalysaattoria. Molemmilla on määritetty anioneja: kloridia, nitraattia, fosfaattia ja sulfaattia. Kationeista ammonium voidaan määrittää molemmilla laitteilla. Ionikromatografia antaa samalla myös yhden arvoiset ionit: natriumin ja kaliumin.

Ionikromatografiassa käytetään kationien erottamiseen 10 µm polystyreenigeeliä, jossa on sulfonoituja funktionaalisia ryhmiä. Kationieluenttina käytetään 2 mM typpihappoa. Anionit erotetaan 10 µm polymeta-akrylaattigeelillä,jossa on kvaternäärisiä ammoniumryhmiä. Eluenttina käytetään 1,3 mM glukonihappo/1,3 mM boorihappo-puskuriliuosta, jonka pH on 8,5. Ionikromatografiassa käytetään johtokykydetektoria.

FIA-vesianalysaattori

FIA-analysaattorin toiminta perustuu virtausinjektiotekniikkaan. Ioneista muodostetaan sekoituskammiossa reagenssien avulla värillinen kompleksi, jonka intensiteetti mitataan spektrofotometrillä. FIA sopii parhaiten suo- ja maavesien tutkimiseen ja sillä on yleensä määritetty ammonium-, nitriitti- ja nitraatti-typpi, fosfaatti ja sulfaatti.

Plasmaemissio- ja atomiabsorptiospektrometrit

Kationeja, kuten kasvinravinteita tai haitallisia raskasmetalleja, voidaan mitata monella tavalla. Yleisimmin mittalaitteena on atomiabsorptiospektrometri tai plasmaemissiospektrometri.

Atomiabsorptiossa mittaaminen perustuu atomien absorptioon ja plasmaemissiossa atomien emittoimiseen. Molemmissa menetelmissä näyteliuos syötetään kuumaan liekkiin, jossa tapahtuu atomien virittyminen.

Plasmaemissiospektrometrilaite on syrjäyttänyt liekkiatomiabsoptiolaitteen nopeutensa ja tarkkuutensa ansiosta. Plasmalaite ei kuitenkaan korvaa atomiabsorptio-grafiittiuunilaitetta, jonka etuna on herkkyys. Grafiittiuunilaitteella määritetään hyvin pienet 10^{-9} g/l tasoa olevat pitoisuudet. Näytteistä määritetään yleensä pääravinteet (kalium, kalsium ja magnesium) ja hivenravinteet (kupari, rauta, mangaani, sinkki ja molybdeeni) sekä haitalliset raskasmetallit (kadmium ja lyijy) ja alumiini. Plasmaemissiospektrometrillä voidaan mitata myös kasvien fosfori ja rikki.

Hiili-typpi-vety-analysaattori

Kasvi- ja maanäytteistä määritetään kokonaistyppi ja -hiili LECO-laitteella. Laitteessa näytteet poltetaan puhtaassa hapessa, ja syntyvistä palamiskaasuista laite määrittää infrapunadetektorien avulla hiilidioksidi- ja vesimäärät ja niiden perusteella laskee kokonaispitoisuudet. Typpi määritetään lämmönjohtokykykennolla. Kasvi- ja humus- sekä turvenäytteet analysoidaan puristeina ja kivennäismaa tinakapseleissa.

Termien selityksiä

Emäskyllästysaste. Emäksisten kationien (Na^+, K^+, Mg^{2+}, Ca^{2+}) suhteellinen osuus kationinvaihtokapasiteetista. Suuri emäskationien määrä edistää maan kykyä vastustaa happamoitumista.

Hapan laskeuma. Kokonaisvetyionikuormitus pinta-alayksikköä kohti tiettynä aikana, esim. mg/m^2 vuodessa. Vetyionikuormitusta aiheuttavat mm. kaasumaiset rikin ja typen oksidit sekä orgaaniset yhdisteet, jotka hapettuessaan ja reagoidessaan ilmakehän kosteuden kanssa muodostavat vahvoja ja heikkoja happoja (esim. rikki-, typpi- ja suolahappo, karboksyyli- ja etikkahappo).

Kationinvaihtokapasiteetti. Maahiukkasiin sitoutuneiden, mutta ioninvaihtoreaktioissa maaveteen vapautuvien ns. vaihtuvien kationien (esim. H^+, K^+, Ca^{2+}, Al^{3+}) kokonaismäärä. Kuvaa maahiukkasten kykyä sitoa pinnalleen positiivisesti varautuneita ioneja, kationeja. Ilmoitetaan vetyionien (H^+) varauksena massayksikköä kohti, me/kg tai mmol/kg.

Kuivalaskeuma. Hiukkasmaisessa tai kaasumaisessa muodossa maahan, kasvillisuuteen tai muuhun pintaan laskeutuvat, tarttuvat tai imeytyvät aineet.

Liuoksen happamuus. Happamuus kuvaa liuoksen sisältämien vetyionien määrää, mitä enemmän vetyioneja (H^+) on, sitä happamampaa liuos on. Vetyioneja vapautuu happojen liuetessa veteen. Vesien kokonaishappamuus muodostuu vahvojen ja heikkojen happojen kokonaismäärästä. Vahvat hapot, esimerkiksi rikki- ja suolahappo, luovuttavat helposti kaikki vetyioninsa liuokseen, eli ovat täysin hajaantuneita eli dissosioituneita. Heikot hapot, esimerkiksi hiilihappo, luovuttavat vain osan vetyioneistaan ja ovat vain osittain dissosioituneita.

Maan happamoitumistunnukset. Metsämaan happamoitumista voidaan tarkastella esimerkiksi maan pH:n, ns. vaihtuvan happamuuden (ks. alla), liukoisen alumiinin ja emäskationien osuuden avulla. pH-luku kuvaa lähinnä maaveden happamuutta ja vaihtuva happamuus maaveden happamuutta, kun maahiukkasiin kiinnittyneet kationit ovat kationinvaihtoreaktioiden tuloksena siirtyneet maaveteen (ks. 3.4 *Happamuuden neutraloituminen maassa,* s. 61). Happamuuden arvioinnissa käytetään vetyionien lisäksi ns. happamia kationeja (alumiini, rauta ja mangaani) ja emäksisiä kationeja (kalsium, kalium, magnesium ja natrium).

Happamoituminen voidaan määritellä paitsi happamien kationien määrän lisääntymiseksi myös emäskationien määrän vähenemiseksi.

Maan happamuus. Yleisin tunnus maan happamuudelle on pH-luku, joka osoittaa maavedessä vapaana olevien vetyionien pitoisuuden. Laboratoriossa happamuus mitataan pH-mittarilla maavesilietoksesta. Ks. myös seuraavat termit "maan vaihtuva happamuus" ja "maan kokonaishappamuus".

Maan kokonaishappamuus. Maahiukkasiin sitoutunut happamuus, joka määritetään uuttamalla maata puskuroidulla suolaliuoksella, esim. neutraalilla (pH = 7) ammoniumasetaatilla, ja titraamalla suodos tunnetunvahvuisella emäksellä pH 7:ään. Vaihtuvien vety- ja alumiini-ionien lisäksi happamuutta eli vetyioneja syntyy neutraloitumisen yhteydessä orgaanisista hapoista:

$$\text{R-COOH-H} \underset{\text{pH laskee} \leftarrow}{\overset{\text{pH nousee} \rightarrow}{\leftrightarrow}} \text{COOH}^- + \text{H}^+,$$

Reaktioyhtälössä $COOH^-$ on orgaanisille hapoille tyypillinen karboksyyliryhmä. Orgaaniset hapot muodostavat siis maan happamuutta säätelevän puskurin: jos pH pyrkii ulkoisen syyn takia nousemaan, niistä vapautuu vetyioneja ja jos pH pyrkii laskemaan, ne sitovat vetyioneja.

Maan vaihtuva happamuus. Maahiukkasiin sitoutunut happamuus, joka voidaan vapauttaa neutraalilla puskuroimattomalla suolaliuoksella ($BaCl_2$, KCl, $CaCl_2$ jne.). Osa happamuudesta johtuu suoraan maahiukkasten pinnoilta maaveteen siirtyvistä vetyioneista (H^+), osa maaveteen siirtyvistä ja neutraloitumisen yhteydessä vetyioneja muodostavista alumiini-ioneista. Alumiini-ionit reagoivat veden kanssa tuottaen lisää vetyioneja:

$$Al^{3+} + 3\ H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3\ H^+$$

Vaihtuvan happamuuden takia maan pH:n nousu on hidasta maan kalkituksen jälkeen. Maan vaihtuva happamuus on lähes aina alle 10 % kokonaishappamuudesta.

Maavesi = maaperässä oleva vesi.

Metsikkösadanta = latvuskerroksen läpi metsämaahan tuleva sade.

Mineralisaatio. Orgaaninen (eloperäinen) aine hajoaa epäorgaanisiksi ioneiksi kasveille käyttökelpoiseen muotoon.

Mykorritsa = sienijuuri. Mykorritsasieni kasvaa symbioosissa puiden juurten kanssa. Se lisää puiden hienojuurten pinta-alaa ja lisää niiden veden ja ravinteiden ottoa. Sieni puolestaan saa puulta kasvuun tarvittavia yhteyttämistuotteita.

Märkälaskeuma. Sadevesi ja siihen liuenneet aineet, jotka laskeutuvat ilmasta maahan, kasvillisuuteen tai muille pinnoille.

pH-luku. Liuoksen pH-luvulla kuvataan sen happamuutta. pH määritellään liuoksen vetyionipitoisuuden (moolia tilavuusyksikköä kohden) negatiiviseksi logaritmiksi eli $pH = -\log(H^+)$. pH-asteikon logaritmisuudesta johtuu, että esim. yhden pH-yksikön lasku tarkoittaa happamuuden kymmenkertaistumista. Liuos on neutraali, kun sen pH-luku on 7. Happaman liuoksen pH-luku on pienempi kuin 7 ja emäksisen suurempi kuin 7.

Luonnonvedet ovat yleensä happamia, koska niihin liukenee ilmasta hiilidioksidia, jolloin syntyy hiilihappoa. Kun sadevesi on

tasapainossa ilman hiilidioksidin kanssa, sen pH-luku on noin 5,6. Ilmansaasteiden takia sadevesi on kuitenkin yleensä happamampaa.

Ravinnedynamiikka. Ravinteiden kierto metsäekosysteemissä, ravinteiden ajallinen ja paikallinen jakautuma sekä ravinteiden käyttöön ja ravinnevirtoihin vaikuttavat prosessit.

Ravinnetase. Ekosysteemiin sadannan mukana tulevien ja huuhtoutuvan veden pois kuljettamien ravinnemäärien erotus.

Sulfaatti- eli alunamaat. Rannikoiden orgaanista ainetta ja rikkiyhdisteitä sisältävät hienorakeiset maat, jotka jouduttuaan kosketuksiin hapen kanssa muuttuvat hyvin happamiksi sulfidirikin hapettuessa mm. rikkihapoksi.

Vajovesi = maan läpi valuva vesi.

Vapaa sadanta = avoimelle paikalle tuleva sade.

Viljavuus. Metsätaloudessa viljavuudella tarkoitetaan useinmiten kasvupaikan puuntuotoskykyä eli boniteettia. Maan viljavuudella tarkoitetaan maaperätekijöiden perusteella määräytyvää puuntuotoskykyä.

Julkaisussa käytetyt kasvien, sienten ja eläinten nimet

Putkilokasvit

Haapa	*Populus tremula*
Hernekasvit	Fabaceae
Kanerva	*Calluna vulgaris*
Kangasmaitikka	*Melampyrum pratense*
Koivu	*Betula pendula*, *B. pubescens*
Kuusi	*Picea abies*
Leppä	*Alnus incana*, *A. glutinosa*
Metsälauha	*Deschampsia flexuosa*
Mänty	*Pinus sylvestris*
Mustikka	*Vaccinium myrtillus*
Pihlaja	*Sorbus aucuparia*
Ponderosamänty	*Pinus ponderosa*
Punamänty	*Pinus densiflora*
Puolukka	*Vaccinium vitis-idaea*
Raita	*Salix caprea*
Saksanpihta	*Abies alba*
Sianpuolukka	*Arctostaphylos uva-ursi*
Vadelma	*Rubus idaeus*
Variksenmarja	*Empetrum nigrum*
Vuorimänty	*Pinus mugo*

Sammalet ja jäkälät

Harmaahankakarve	*Pseudevernia furfuracea*
Harmaaporojäkälä	*Cladonia rangiferina*
Harmaaröyhelö	*Platismatia glauca*
Hopeahiirensammal	*Bryum argenteum*
Kangaskynsisammal	*Dicranum polysetum*
Kangastinajäkälä	*Stereocaulon pascale*
Keltaröyhelö	*Cetraria pinastri*
Keltatyvikarve	*Parmeliopsis ambigua*
Kerrossammal	*Hylocomium splendens*
Kulosammal	*Ceratodon purpureus*
Lupot	*Bryoria* spp., *Alectoria sarmentosa*
Metsäkerrossammal	*Hylocomium splendens*
Naavat	*Usnea* spp.
Nahkajäkälät	*Peltigera* spp.
Nuotiosammal	*Funaria hygrometrica*
Palleroporonjäkälä	*Cladonia stellaris*
Raidanisokarve	*Parmelia sulcata*
Ruskoröyhelö	*Cetraria chlorophylla*
Seinäsammal	*Pleurozium schreberi*
Seinäsuomujäkälä	*Hypocenomyce scalaris*
Sormipaisukarvejäkälä	*Hypogymnia physodes*
Sulkasammal	*Ptilium crista-castrensis*
Tyvikarpeet	*Parmeliopsis hyperopta*, *P. aleurites*
Valkohankajäkälä	*Evernia prunastri*
Valkoporonjäkälä	*Cladonia arbuscula*
Varstasammalet	*Pohlia* spp.
Viherkuprujäkälä	*Scoliciosporum chlorococcum*
Viherlevä	*Apatococcus lobatus*

Sienet

Harmaakariste	*Lophodermella sulcigena*
Juovakariste	*Lophodermium macrospora*
Juurikääpä	*Heterobasidium annosum*
Koivunruoste	*Melampsorium betulinum*
Kuusenneulaskariste	*Lophodermium picea*
Kuusenruoste	*Chrysomyxa abietis*

Lumihomeet	*Phacidium* spp.
Mesisieni	*Armillaria* spp.
Männynmesisieni	*Armillaria obscura*
Männynneulaskariste	*Lophodermium seditiosum*
Männynlumihome	*Phacidium infestans*
Männynversosurma	*Gremmeniella abietina*
Neulaskaristeet	*Lophodermium* spp.
Neulasruosteet	*Coleosporium* spp., *Chrysomyxa* spp.
Suopursuruoste	*Chrysomyxa ledi*
Surmakka eli versosyöpä (ks. männynversosurma)	
Tervasroso	*Cronartium flaccidum*, *Endocronartium pini*
Versoruoste	*Melampsora pinitorqua*

Hyönteiset ja punkit

Havupunkki	*Oligonychus ununguis*
Havukirvat	Adelgidae
Juurinilurit	*Hylastes* spp.
Kevätmäntypistiäinen	*Gilpinia virens*
Kaarnakuoriaiset	Scolytidae
Kiiltokuusijäärä	*Tetropium castaneum*
Kirjanpainajat	*Ips* spp.
Kirvat	Aphidoidea
Kuusenoksakirjaaja	*Pityophtorus micrographus*
Kuusentähtikirjaaja	*Pityogenes chalcographus*
Monikirjaajat	*Polygraphus* spp.
Mänty-yökkönen	*Panolis flammea*
Mäntymittari	*Bupalus piniarius*
Neulaspunkki	*Nalepella jacobi*
Pienihavukirva	*Adelges laricis*
Pienikuusikääriäinen	*Semasia nanana*
Pihkakääriäinen	*Retinia resinella*
Pikikärsäkkäät	*Pissodes* spp.
Pikkumäntypistiäinen	*Microdiprion pallipes*
Pilkkumäntypistiäinen	*Diprion pini*
Punalatikka	*Aradus cinnamomeus*
Pystynävertäjä	*Tomicus piniperda*
Ruskomäntypistiäinen	*Neodiprion sertifer*
Rypäsmäntypistiäinen	*Gilpinia socia*
Suomuniluri	*Xylechinus pilosus*
Tukkimiehentäi	*Hylobius abietis*
Tähtikirjaajat	*Pityogenes* spp.
Ukkoniluri	*Dendroctonus micans*
Vaakanävertäjä	*Tomicus minor*
Viirumäntypistiäinen	*Gilpinia frutetorum*
Ytimennävertäjät	*Tomicus* spp.

Muut eläimet

Hirvi	*Alces alces*
Myyrät	*Microtus* spp., *Clethrionomys* spp., *Arvicola* spp.

Hakemisto

A

abioottiset tekijät 25, 136
abioottiset tuhot 9, 26, 76, 132, 133, 197
alikasvos 83
Alkkia 167
alkuaineanalyysit 92
alkuainepitoisuudet 153
altistuskokeet 119, 120
alumiini 20, 55–70, 88, 162, 182, 194, 198, 205, 209
aminohapot 28, 45, 175
ammoniakki 170, 171, 174
ammonifikaatio 49
ammonium 13, 40, 41, 49, 51, 171, 174, 207
ammoniumsulfaatti 172
ammoniumtyppi 115, 171–174
analyysimenetelmät 204
ANC 62
anionit 66
Apatiti 145
arginiini 175
atomiabsorptiospektrometri 207

B

B-horisontti 63, 64
bakteerit 48–51, 151
bioindikaattorit 139, 142, 195
biologinen aktiivisuus 50
biomassa 11, 32, 44, 47, 49, 50, 55, 58, 194
bioottiset tuhot 197
bioottiset tekijät 135
boori 47, 70, 205

C

Cronartium flaccidum 127

D

dendrokronologia 97
dolomiittikalkki 69

E

E-horisontti 54, 63, 64
Eckerö 147
ekosysteemi 10, 12, 18, 22, 26, 30, 34, 44, 45, 48, 49, 53, 139, 159, 193, 199
ekstensiivikoealat 201, 202
elinvoimaisuus 9, 20, 26, 30, 32–35, 71, 75–118, 134, 168–170, 197
elohopea 183
emäskationilaskeuma 13
emäskationit 13, 41, 43, 55, 56, 57, 61, 67, 68, 70, 72, 209
emäskyllästysaste 57, 69, 72, 206, 209
emäspoistuma 60
Endocronartium pini 127
endofyyttiset sienet 151
endofyyttiset mikrobit 150
entsyymiaktiivisuus 49
epifyyttijäkälät 139, 140, 142
epifyyttiset sienet 151
epifyyttiset mikrobit 150

F

FIA-vesianalysaattori 207
fluori 18, 88
fosfori 46, 47, 59, 93, 95, 162, 205, 206

G

glutamiini 175, 188
GTM-malli 189

H

haapa 127, 166
hajottajamikrobit 70
hajotus 44, 47, 48, 49, 52
hakkuusäästöt 192
hapan kastelu 27, 50, 58, 120, 179, 183–185
hapan laskeuma 33, 40, 49, 51, 58, 60, 68, 184, 194, 198, 209
hapan sade 40–44, 123, 153, 185
haponneutralointikyky 61, 62, 68, 70
happamoituminen 12, 19, 20, 24, 34, 40–74, 115, 140, 162, 164, 173, 194, 209
happamoitumisherkkyys 50, 58
happamuus (ks. myös pH) 20, 22, 24, 49, 50, 54, 56, 151, 153, 184, 188, 193, 194, 209, 210
happokäsittely 49, 59
happolaskeuma 59
HAPRO 8, 193
harjakuusi 78, 79
Harjavalta 57, 101, 176, 177, 179–183, 194, 195, 197
harmaakariste 130
harmaaporojäkälä 152
harsuuntuminen 76–78, 80, 83, 88, 99, 107, 108, 115, 136, 168, 169
harsuuntumissarjat 220, 221
harsuuntumistyypit 78, 80
harsuuntuneisuuden arviointi 82, 87
harsuuntuneisuus 84, 88, 102–118, 135, 196, 198
harsuuntuneisuusarvion luotettavuus 35, 86
harsuuntuneisuusluokat 135
Heinola 147
Helsinki 104, 141
hieskoivu 167
Hietaperänkangas 99, 100, 160, 162
hiili-typpi-vety-analysaattori 208
hiilidioksidi 12, 20, 33, 35, 208
hiilivedyt 12
hiivat 150, 151
hirvi 130, 133
hopeahiirensammal 140
huiskilokuusi 79
humus 24, 48, 161, 173, 194, 205, 208
humuskerros 48, 50–52, 54–56, 58, 63–65, 67, 70–73, 161, 164, 181, 194
huuhtoutuminen 59, 60, 62, 65
huuhtoutumisherkkyys 62
huuhtoutumiskerros 54, 56, 64, 65, 164, 181, 194
hyönteistuhot (ks. myös tuhohyönteiset) 28, 77, 88, 134, 136, 197
Hämeenkangas 51, 195
hätäoksat (ks. sekundaariversot)

I

IAP-indeksi 145, 196
ilmaisinlaji 142
ilmakehän muutokset 33
ilmanpuhtausindeksi 145
ilmansaasteindikaattorit 139, 195
ilmaraot 19, 21
ILME-projekti 8, 43, 54, 62, 153, 193, 200, 204
Ilomantsi 45, 46
indikaattorilajit 139
indikaattorit 139, 142, 195
Inkoo 92, 93
intensiivikoealat 201, 202
inventoinnit (ks. VMI)
ionikromatografia 207
itäminen 181

J

jalokuoriaiset 178
jalokuuset 38
johtojännemenetelmä 82, 97–102
johtokyky 206
Jokioinen 65, 66
juovakariste 129, 134
juurikarike 46, 49
juurikääpä 27, 127
juurilaho 127
juurinilurit 130
juurinystyräbakteerit 20
juuristovauriot 161, 171
jäkäläautiot 141
jäkälät 139, 141, 142, 145, 153, 169, 195
Järvenpää 168

K

kaarnakuoriaiset 28, 131, 177, 197
kaasutukset 27, 119, 121, 123, 125
kadmium 21, 155–157, 176, 183, 187, 207
Kalajoki 170
kalium 13, 16, 40, 41, 45–47, 57, 59, 63–65, 68, 88, 93, 95, 173, 205, 207, 209
kalkitus 50, 68–71, 210
kalkkikivijauhe 69
kalsium 13, 16, 40, 41, 46, 47, 50, 56, 57, 59, 63–73, 92–95, 173, 209
kampakuusi 78, 79
kangaskynsisammal 151, 152
kangasmaat 22, 54, 57, 69, 70, 72, 105, 107, 111, 137, 161, 194, 199
kangastinajäkälä 140
karike 46, 48, 96, 141, 147, 193, 197, 200
karikepussi 51
karikesato 46, 147
kariketutkimukset 141
Karvia 167
kaskeaminen 10, 11, 24
Kaskinen 170
kasvihuoneilmiö 33
kasvitauti 25
kasvuindeksi 34, 36, 37, 89
kationit 16, 56, 57, 61–65, 206
kationinvaihto 37, 57, 62, 65
kationinvaihtokapasiteetti 57, 206, 209
kationinvaihtopaikat 61, 65
kaukokulkeuma 115
Kemijärvi 160
kerrossammal 140, 151, 152
kertainventoinnin koealat 102, 103, 132, 133, 137, 200, 201, 203
kevätmäntypistiäinen 186, 187
kiiltokuusijäärä 130
kirjanpainajat 130
kirvat 28, 177, 188, 197
kivennäismaa 46, 48, 51, 52, 54–56, 58, 64, 65, 67, 69, 70
koealajärjestelmät 200
koivu 11, 24, 41–43, 159, 166, 167, 185
koivunruoste 185
Kostamus 115
kromi 21, 155, 156
kuivalaskeuma 16, 43, 171, 172, 193, 209
kuivapoltto 205
kuivuus 134
kulosammal 140
kulotus 24, 68, 72
kunnostuslannoitus 71
kuntotunnukset 75, 77
Kuola 18, 101, 115, 141, 145, 195
kupari 21, 47, 154, 156, 157, 164, 176, 177, 181, 183, 205, 207
kutikula 19
Kuusamo 160
kuusen harsuuntumistyypit 78
kuusen latvustyypit 79
kuusenneulaskariste 129, 134
kuusensuopursuruoste 27
kuusenoksakirjaaja 130
kuusentähtikirjaaja 131
kuusi 11, 36–38, 40, 42, 43, 55, 58, 78–95, 103–125, 127, 129, 132, 133, 136, 142, 146, 148, 150, 159, 168, 169, 177, 195, 220
kylmänkestävyys 122
käpysato 36, 116–118

L

laakakuusi 78, 79
lannoitus 35, 71, 72
laskeuma 13–18, 20, 24, 33, 38, 40, 41, 43, 45, 49, 50, 58, 60, 67, 70
latvusten kunto 102, 173
Lautakotaoja 164, 165
LECO-laite 208
lehtikato 166, 167
lehtipuiden suosiminen 73
leppä 11, 20, 24, 166, 167
leväpeite 148–150, 196
ligniini 52
liikkuvat ravinteet 47
linja-arviointi 200
Lophodermium picea 129
lumituhot 26, 134, 136, 137
lumihome 130
luonnonhuuhtouma 60
lupot 137, 140–143, 147, 148
lusto 33
lyijy 155, 156, 207

M

maanmuokkaus 24, 71
maannousema (ks. juurikääpä)
maaperän happamoituminen 194
maaperän kuparipitoisuus 181
maatuneisuus 60
maavesi 44, 61, 62, 209, 210
magnesium 13, 16, 41, 45–47, 57, 59, 64, 65, 68, 69, 71–73, 88, 92–95, 162, 172, 173, 194, 205, 209
mangaani 47, 57, 59, 63, 64, 166, 205, 207
Mekrijärvi 45, 46
Melanophila formaneki 178
mesisieni 127
MESTA 189
metallikationit 61–65
metsien ikärakenne 30, 32, 34, 74
metsien kasvu 22, 23, 30–38
metsien puuvaranto (ks. metsävarat)
metsikkösadanta (ks. sadanta)
metsikön ravinnekierto 44
metsälaiduntaminen 11
metsälauha 140, 171
metsämaan happamuus 55, 199
metsämaan viljavuus 23, 24
metsäpalot 10–12
metsätuhot (ks. myös abioottiset tuhot, hyönteistuhot, tuhohyönteiset, sienituhot, tuulituhot) 105, 133–135, 190
metsävarat 30, 38, 198
miinaajat 28
mikrobit 45, 48–53, 68, 72
mikrobodi 120, 123
mineraalit 44, 61
mineralisaatio 44, 46, 70, 210
mitokondrio 120
molybdeeni 47, 205
monikirjaajat 130
Montsegorsk 145, 146
moreenimaat 22
museonäytteet 141
mykorritsat 20, 210
myrskyt (ks. tuulituhot)
myyrät 130
männyn harsuuntumistyypit 80
männynneulaskariste 130
männynversosurma (ks. versosurma)
Mäntsälä 91
mänty 10, 11, 27, 29, 35–37, 41–43, 45–47, 52, 58, 79–82, 84, 87, 90, 92–112, 115–122, 127–133, 136–138, 142, 146, 152, 159–165, 168–171, 175–187, 195–197, 221
mänty-yökkönen 130, 186, 187
mäntymesisieni 127
mäntymittari 130, 186, 187
mäntypistiäistuhot 179
märkyys 134
märkälaskeuma 16, 171, 210
märkäpolttomenetelmä 205

N

naavat 137, 140–143, 147, 148
nahkajäkälät 140
natrium 57, 59, 205, 207
nauhakuusi 79
neulaskarikkeen määrä 96, 97
neulaskariste 27
neulaskato 86, 115, 159
neulasmassa 36, 85, 86, 197
neulasten ikä 92
neulasten keltakärkisyys 107, 110, 196
neulasten solurakenne 120
neulasten variseminen 80, 96
neulasten värierot 110
neulasten värioireet 77, 88, 107, 115
neulasten väriviat 134, 196
neulasvuosikerrat 76, 80, 98, 100, 107, 168
neutraloituminen 61, 62, 65
Nikel 145
nikkeli 155–157, 176
nila 28, 47
nitraatti 40, 41, 49
nitraattityppi 171
nitrifikaatio 49
nuotiosammal 140
Nurmijärvi 168

O

ohutjuuret 56
ojitus 35
oksatuhot 102, 110
orgaaninen kerros 48
otsoni 15–22, 27, 33, 88, 89, 123, 196
otsonikaasutuskokeet 123
Oulanka 17
Oulu 115
Outokumpu 195

P

pakkanen 88, 133, 134, 136
pakkastuhot 161
paksuuskasvu 97
palleroporonjäkälä 140
Parkano 51, 65, 66
Pello 160
pH 24, 43, 45, 49, 51, 54, 56, 59, 66, 67, 69, 73, 185, 186, 188, 206, 209, 210
pienihavukirva 134
pienikuusikääriäinen 134
pihkakääriäinen 134
pihkavuoto 111, 113, 114
pihlaja 166
pikikärsäkkäät 130
pikkumäntypistiäinen 186, 187
pilkkumäntypistiäinen 130, 179, 180, 186, 187
pintamikrobit 150
pintaturve 59, 60
pioneerilajit 140
plasmaemissiospektrometri 207
plastoglobulit 120–125
podsoli 23, 64
podsolimaannos 54
pohjamaa 64, 65
Pohjankangas 195
ponderosamänty 88
primaariversot 77, 111
puiden elinvoimaisuus 75
puiden kasvu 198
punalatikka 28, 29, 130, 134
punamänty 27
Punkaharju 96
puolukka 152
puolustusreaktiot 183
puskurikyky 24, 50, 51, 57, 61–63, 175, 194, 199
puulajivalinta 24, 73
puunkorjuu 12, 24, 60, 133
puuston yli-ikäisyys 192
pystynävertäjä 130, 177, 178
pysyvät koealat 201, 202

R

Raahe 57, 115, 194, 195
raakahumuskerros 70
raita 166
Ranua 160
rapautuminen 22, 44, 55, 61, 62, 64
raskasmetallit 18, 21, 33, 57, 176, 187, 194, 195, 199
rauduskoivu 185
rauta 21, 47, 57–59, 61–65, 154, 156, 176, 182, 205, 207, 209
ravinnekationit 64
ravinnekierto 40, 44, 46, 47, 62, 211
ravinnetase 44, 193, 211
Rhizosphaera kalkhoffii 27, 129
rikastumiskerros 56, 58, 64, 65
rikki 14, 16, 20, 45, 46, 58, 60, 70, 92, 94, 95, 153, 154, 157, 172, 190, 194, 206, 209
rikkidioksidi 14, 123, 176
rikkidioksidikäsittelyt 27, 119, 151
rikkidioksidipitoisuus 163
rikkidioksidivauriot 88
rikkilaskeuma 13, 14, 16, 115, 172, 199
rikkiyhdisteet 92
Rovaniemi 99, 100, 147
runkotilavuus 31
runkovalunta 40
ruostesienet 27, 127, 137
Ruotsinkylä 51, 91
ruskomäntypistiäinen 26, 130, 134, 179, 186–188
rypäsmäntypistiäinen 186
ryväsotanta 200

S

sadanta 40, 43, 46, 61, 65, 193, 210
sadetus 58, 59, 188
sadevesi 40–44, 65, 67, 184, 188, 193, 199
Salla 67, 68, 92, 93, 146, 160–165
sammalet 139, 195
Savukoski 146
seinäsammal 140, 152
sekundaariversot 76–78, 110, 112
selluloosan hajoaminen 51
sianpuolukka 141
siemensato 36, 147
sienituhot 9, 20, 26, 27, 76, 77, 88, 127–130, 133, 136–138, 150, 163, 167, 183–185, 197
sinkki 47, 177, 182, 205, 207
solulima 120–124
solurakennemuutokset 121

soluvauriot 19, 123
sormipaisukarve 143, 144, 147, 148, 153–155, 157, 195
stressi 19, 27, 28, 75, 76, 114, 119
strooma 120–124
sukkessio 10
sulfaatti 40, 41, 43, 54, 66, 67, 211
suomuniluri 177
Suonenjoki 120
suopursuruoste 129, 134
surmakka (ks. versosurma)
Sätsi 67, 164, 165

T

taimettuminen 181
talveentumishäiriöt 176
talveentumiskokeet 120
taudinkestävyys 184
tervanpoltto 11
tervasroso 27, 80, 127, 133, 134, 136
Tornio 57, 194, 195
tuhka 13, 58, 72
tuhkalannoitus 72
tuhohyönteiset 9, 12, 20, 25, 26, 28, 88, 130, 134, 176, 180, 186–188
tukkimiehentäi 130, 131
turkistarhat 115, 140, 170–175, 194
turvemaat 22, 35, 58, 60, 69, 70–72
tuulituhot 26, 133, 136, 137, 159, 170, 171, 195
Tuusula 51, 65, 66, 85, 87, 91, 93, 168
typen oksidit 13, 209
typensuosijat 140
typpi 13, 15, 16, 18, 20, 21, 28, 33, 35, 41, 42, 45–47, 51, 59, 70, 72, 73, 92–95, 153, 154, 174, 207, 209
typpihappokaasutukset 119, 123
typpilaskeuma 13, 15, 16, 115, 148, 170, 171, 194, 199
tyvilaho 127
tyvitervastauti 127
tähtikirjaajat 130
tärkkelysjyvänen 120, 121

U

ukkoniluri 130
Utö 17

V

vaakanävertäjä 130
vadelma 140
vahvat hapot 207
vajovesi 46, 67, 68, 211
vallitsevat latvuskerrokset 83
vallitut latvuskerrokset 83
valtakunnan metsien inventointi (ks. VMI)
vanhat metsät 12, 26, 30, 37, 45, 46, 76, 77, 79, 105, 107, 110, 111, 114, 115, 152, 183, 192, 198
Vantaa 168
vapaa sadanta 40, 211
variksenmarja 141
varstasammalet 140
versoruoste 27, 127
versosurma 27, 36, 128, 133, 136–138, 162, 163, 165, 184, 185, 197
versosyöpä (ks. versosurma)
vesinäytteet 204
vesitalous 21, 26, 28
vetyionit 16, 46, 63, 67, 209, 210
vetyionilaskeuma 13, 41
viherhiukkaset 120–125
viherkuprujäkälä 144
viherlevät 144, 148, 149, 171, 195
viirumäntypistiäinen 186, 187
viljavuus 10, 20, 23, 24, 51, 54, 55, 58, 67, 73, 74, 159, 164, 194, 195, 199, 211
Vilppula 147
Virolahti 16, 17
vitaliteetti (ks. elinvoimaisuus)
VMI 30, 31, 33, 35–38, 54, 89, 102, 103, 132, 133, 135, 145, 152, 200, 201
vuorimänty 99
vuosilusto 33

Y

yli-ikäiset metsät (ks. vanhat metsät)
ylispuut 83
ytimennävertäjät 130, 134

Ä

Ähtäri 16, 17
äkämät 28

Kuusen ja männyn harsuuntumissarja

Kuusen harsuuntumisen eteneminen. Valokuvat: Erkki Oksanen.



0–20 %



21–40 %



41–60 %



61–100 %

Männyn harsuuntumisen eteneminen. Valokuvat: Erkki Oksanen.



0–20 %



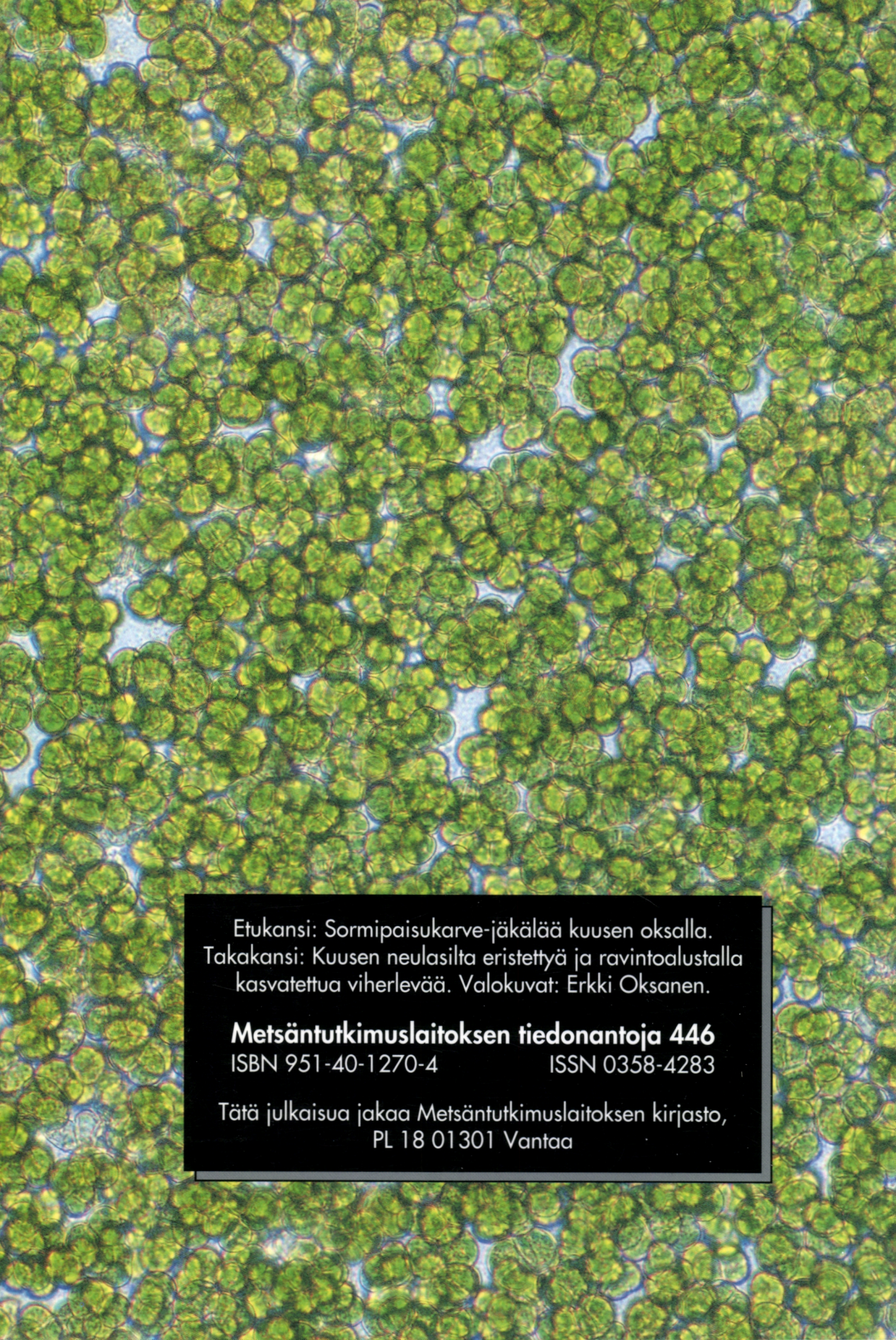
21–40 %



41–60 %



61–100 %



Etukansi: Sormipaisukarve-jäkälää kuusen oksalla.
Takakansi: Kuusen neulasilta eristettyä ja ravintoalustalla kasvatettua viherlevää. Valokuvat: Erkki Oksanen.

Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 446
ISBN 951-40-1270-4 ISSN 0358-4283

Tätä julkaisua jakaa Metsäntutkimuslaitoksen kirjasto,
PL 18 01301 Vantaa