

Erkki Lähde, Olavi Laiho, Yrjö Norokorpi, Reijo Solantie ja Heikki Tuomenvirta

Etelä-Suomen metsien kunto ja siihen vaikuttavista tekijöistä

Taustaa

Etelä-Suomessa on viime vuosina kuollut runsaasti yksittäisiä kuusia ja kuusiryhmiä. Tuho näyttää vuosi vuodelta lisääntyneen. Vaikka sen voimakkuus ja yleisyys vaihtelevat eri puolilla eteläistä Suomea, niin kokonaisuudessaan ilmiö on laaja-alainen ja havaittavissa lähes kaikilla paikkakunnilla. Kuolleitten ja huonokasvuisten puiden poistaminen ei näytä pysäyttävän tuhon etenemistä metsikössä. Tuho ei näytä liittyvän erityisesti pui-

den ikään, kasvupaikkaan eikä puuston tiheyteen. Myös verrattain avoimessa tilassa, esimerkiksi aukkojen reunassa kasvavia, nuorehkoja, aiemmin hyvin kasvaneita kuusia saattaa kohdata nopea kuolema ilman selvästi todettavaa perussyötä. Männyllä ilmiö ei näytä yhtä pitkälle edenneeltä, mutta lehtipuut ovat jo useina kesinä oirehtineet näkyvästi.

Kuusten ulkonäkö on usein huono, jopa ränsistynyt. Harsuuntuminen eli neulasvajausta on selvästi havaittavissa. Neulasten väri on monissa puissa haalistunut tai ruskehtava ja neulaset siirrottavat epä säännöllisesti. Ns. hätäoksia esiintyy yleisesti. Kuusen kukkiminen on ollut toistuvasti runsasta ja yleistyntynyt pienikokoisillakin puilla. Kuusen pituuskasvu näyttää hidastuneen, vaikka kasvukaudet ovat olleet suhteellisen edullisia. Mainitut oireet ja pih-

Erkki Lähde, Olavi Laiho ja Yrjö Norokorpi ovat Metsäntutkimuslaitoksen tutkijoita, **Reijo Solantie ja Heikki Tuomenvirta** toimivat tutkijoina Ilmatieteen laitoksessa.

kavuotojen runsaus antavat kuusille niin kutsutun "itkevän" yleisvaikutelman. Myös männyt ovat har-suuntuneita, mutta pituuskasvun tyrehtyminen ei ole yhtä voimakasta kuin kuusella. Useana vuonna on koivuilla ja muilla lehtipuilla ilmennyt ennenaikaista lehtien rusketumista, kellastumista ja varisemista. Hyvin yleistä on lisäksi ollut keväisin lehtipuiden silmujen epätasainen aukeaminen ja lehtien epämuotoisuus jo kehityksen alkuvaiheessa.

Jo yli vuosikymmenen ajan eräät aktiivisesti metsien terveydentilaa seuraavat metsänomistajat ovat kertoneet havainneensa em. puiden oireilua. Heidän mukaansa puiden latvaosat ovat aiempaa kuivempia ja mantopuun osuus on vähentynyt. Erityisesti he ovat kiinnittäneet huomiota kuusen kunnan heikentymiseen ja pituuskasvun pienenemiseen. Havaintojensa tueksi he ovat esittäneet mm. hakkuualueilta kaadetuista puista tekemiään pituuskasvumittauksia. Myös eräät metsäammattilaiset ovat esittäneet huolestuneina samankaltaisia havaintoja.

Julkaisun tekijät ovat saaneet käyttöönsä Aarne Juhonsalolta ja Matti Juhonsalolta kuusen ja männyn pituuskasvumittausten aineistoja. Ylimeteorologi, FT Reijo Solantie on laatinut raportin säidenvaihtelua ja kuusen siihen sopeutuneisuutta käsittelevän osan. Tutkija, FK Heikki Tuomenvirta on avustanut säätilastojen analysoinnissa. Lähinnä FT Sirkka Sutisen tekemien tutkimusten perusteella on koostettu ilmansaastevarioita käsittelevä osa, johon dos. Yrjö Norokorpi on valmistellut orgaanisia hiilivetyjä koskevan osan. MMT Olavi Laiho, prof. Erkki Lähde ja dos. Yrjö Norokorpi ovat yhteistyönä koostaneet em. materiaalin ja muiden käytävissä olevien tietojen pohjalta tämän kirjoituksen.

Puiden pituuskasvun vaihtelu

Valtakunnallisten inventointien mukaan puuston tilavuuskasvu säilyi varsin samana 1920-luvulta 1940-luvulle (Ilvessalo 1956). Sen jälkeiset kaksi vuosikymmentä kasvu lisääntyi vuosittain lievästi ja 1960-luvun puolivälistä lähtien jyrkemmin (Kuusela ja Salminen 1991). Tällöin vuotuinen kasvunlisäys oli lähes 1 milj. m³ vuodessa. Äskettäin valmistuneen kahdeksannen inventoinnin mukainen kasvu oli 77 milj. m³. Aineisto kerättiin vuosina 1986–1994. Kaikkien puulajien kasvu oli lisäänty-

nyt edelliseen inventointiin verrattuna (Valtakunnan metsien ... 1995).

Tätä taustaa vasten on yllättävää, että Satakunnan metsälautakunnan alueella kuusen kasvu oli aikajakson 1987–1994 kattavan 8. inventoinnin päivitysmittauksen mukaan pudonnut lähes 20 %, vaikka sen tilavuus oli samanaikaisesti lisääntynyt yli 9 % (Satakunnan metsä ... 1996). Täten kuusen kasvuprosentti oli pudonnut peräti 26 %. Lehtipuuston kasvu oli pienentynyt lähes 10 %, ja männyn kasvu lisääntynyt yli 2 %. Vastaavat kasvuprosenttien alenemat olivat 21 ja 9 %. Kokonaispuusto oli lisääntynyt 11 %, kasvu alentunut 9 % ja kasvuprosentti 18 %. Inventointitutkijoiden julkisuuteen antamien ennakkotietojen mukaan metsien kasvu on hidastunut myös muualla Etelä-Suomessa (Puuston kasvu ... 1996). Pudotus on Kaskinen–Mänttä–Rantasalmi–Kitee-linjan eteläpuolisella alueella keskimäärin yli neljä prosenttia. Puulajien väliset kasvusuhteet olivat koko eteläisessä Suomessa samankaltaiset kuin Satakunnassa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedotteen mukaan myös kuusen siemensato on vuonna 1996 poikkeuksellisen huonolaatuinen, vaikka käpysato onkin runsas (Kuusen luontainen... 1996). Varsinkin Länsi- ja Etelä-Suomessa terveiden siementen määrä on jäänyt hyvin alhaiseksi.

Puun tilavuuskasvu koostuu läpimitan kasvusta ja pituuden lisääntymisestä. Vuosittainen paksuus- ja pituuskasvu eivät ole kiinteässä riippuvuussuhteessa toisiinsa (Mikola 1950). Vuosilustojen havainnointi edellyttää jatkuvaa paksuuskasvun mittausta, kasvukairan käyttöä tai puun kaatoa. Lustojen tarkka mittaus puolestaan edellyttää mikroskooppista tutkimista. Kasvun tunnuksena lustopakkaus on sikäli epävakaa, että se riippuu metsikön tiheydestä ja yleensä käsittelystä (Vuokila 1980). Pituuskasvu puolestaan on niistä paljon riippumattomampi ja havupuiden osalta selkeästi erotuva. Haittapuolena on, että isojen puiden vuotuisen pituuskasvun tarkka mittaus edellyttää käytännössä niiden kaatamista.

Tässä yhteydessä esitellään joukko eri henkilöiden tekemiä kuusen ja männyn pituuskasvun mittauksia. Ne on useimmiten tehty käytännön hakkuu-aloilta. Tällöin on pyritty hyödyntämään tie- ja oja-linjat sekä avohakkuut. Myös lumenmurtamat ja tuulenkaatat puut ovat tarjonneet aineistoa. Kooltaan suurimmat osa-aineistot koostuvat kuitenkin

pääosin harvennushakkuista. Näiltä hakkuualoilta on mitattu jokainen eteensattunut vapaana kasvanut mittauskelpoisena säilynyt latvus. Mittaustulokset esitetään ilman ikäkorjausta.

Käytännön työmailla pituuskasvua päästään mittaamaan vasta puutavaran kasauksen tai ajon jälkeen. Tällöin vain latvat ovat jäljellä. Nopeakasuvisimpien puiden latvakappaleessa ei aina ole viittä vuosikasvainta enempää. Lisäksi kuusella sitä vanhempien vuosikasvainten erottaminen vaikeutuu huomattavasti. Mittausjakson pituutena olikin useimmiten viisi vuotta. Tällöinkin jouduttiin monesti tarkistamaan sivuoksista ja tarvittaessa poikileikkauksesta määrittämisen oikeellisuus. Laajimmissa aineistoissa on mukana myös puita, joissa oli ranganvaihto. Osalla aineistoa, etenkin tutkimuskoealoilla ja oman metsän hakkuussa mittaukset voitiin tehdä ennen puutavaran kasaamista ja tällöin päästiin pidempiin aikasarjoihin, joskin näytteen koko jäi verraten pieneksi. Kaiken kaikkiaan havainnot käsittävät 2979 kuusta ja 722 mäntyä (taulukko 1 ja 2).

Ensimmäiset mittaukset ovat vuodelta 1987 (Jokioinen ja Tuusula) mutta pituuskasvuun ja kuusen kuntoon oli kiinnitetty huomiota jo muutama vuosi aikaisemmin. Jokioisista ja sen lähikunnista mittauksia on tältä ajankohdalta 20 hakkuualalta. Näillä oli poikkeuksetta viimeinen kasvain lyhin. Pituuskasvu aleni vuodesta 1983 vuoteen 1987 alle puoleen. Myöhempiin mittauksiin verrattuna nämä havainnot koostuivat kokonaisuudessaan pahoin kituvista metsiköistä ja niiden huonokuntoisimmista puista. Yhdellä hakkuualalla puut luokiteltiin sen mukaan, oliko latvuksessa värvikaa, neulaskatoa, pihkavuotoa tai latvasilmun häiriötä (pituuskasvu sivuhaaroja lyhyempi). Eriasteisia muutoksia olikin runsaasti ja ne heikensivät pituuskasvua (taulukko 3).

Seuraavina vuosina mittauksia jatkettiin eri puollilla Etelä-Suomea. Useimmissa kohteissa kuusen kasvun hidastuminen oli mittausjakson aikana huomattava (taulukko 1 ja kuva 1). Muutokset olivat säännöllisiä. Vuonna 1988 kasvu tilapäisesti elpyi edellisvuodesta ja laski uudelleen seuraavana kesänä. Toinen lievä elpymisvaihe oli vuosina 1991 ja 1992, jolloin pituuskasvu saavutti kuitenkin vain kesän 1987 tason. Tosin viimeisimmät mittaukset ovat vain pohjoisimmilta alueilta, Vilppulasta ja

Oulaisista. Aineistoon sisältyi sekä ensiharvennuskasvua että varttunutta puustoa. Kuusen pituuskasvun voimakkain hidastuminen ajoittui vuosiin 1986–90. Hidastuminen ei ollut yhtä voimakasta kaikilla alueilla. Tuusulassa alenema oli vähäisin.

Parkanon ja Siilinjärven havainnoissa kuusen runsaskaan käpysato ei vaikuttanut pituuskasvuun. Kasvukauden 1989 pituuskasvu oli samansuuruisen, vaikka puissa oli käpyjä runsaasti, kohtalaisesti, niukasti tai ei lainkaan. Samanlainen tulos saatiin Jokioisista. Tulos oli odotettavissa, sillä pituuskasvuun keskeisesti vaikuttava päätesilmu (Laitakari 1920, Mikola 1950) kääpiöverson aiheineen muodostuu jo edellisenä kasvukautena. Tästä syystä käpysato vaikuttanee kuusella ensisijaisesti sitä seuraavan vuoden pituuskasvuun. Aineiston keräystapa ei mahdollistanut seuraavan vuoden pituuskasvun mittausta samoista puista, mutta kokonaisuudessaan vuoden 1990 pituuskasvu oli kuusella erittäin heikko. Etelä-Suomessa myös vuosi 1992 oli kuusella runsaskäpyinen ja seuraava vuosi kasvun suhteen alle keskitason. Kun verrataan tämän aineiston kuusen pituuskasvun vaihtelua ja kuusen käpysatoa Etelä-Suomessa vuosina 1987–1993 (Lindgren ja Salemaa 1994), havaitaan lievä negatiivinen riippuvuus käpysadon runsauden ja kuusen seuraavan kesän pituuskasvun välillä.

Koska kuuseen kiinnitettiin erityisesti huomiota, männyn osalta aineisto on sitä niukempi. Se on samoilta paikkakunnilta kuin kuusen, monessa tapauksessa samoista metsiköistäkin taaten siten hyvän vertailukelpoisuuden. Kautta linjan on nähtävissä männyn tasaisempi pituuskasvu (kuvat 1 ja 2). Jokioisten alueella ja Oulaisissa alenema oli männylläkin selvä, mutta Tuusulassa ja Vilppulassa se oli vähäistä. Pituuskasvun hidastuminen myötäilee männyn ja kuusen tilavuuskasvussa todettua hidastumista.

Esimerkkiaineistossa erottuvat heikkoina pituuskasvu vuosina erityisesti vuodet 1987 ja 1990 sekä toisaalta keskimääräistä parempina vuosina 1988 ja 1991. Kesä 1986 oli keskimääräistä lämpimämpi ja sateisempi etenkin loppukesästä (taulukot 4 ja 5). Talvi 1986–87 oli erittäin kylmä, mutta pakkaset eivät yltäneet lähellekään kotimaisten havupuiden sietorajoja. Kesä 1987 oli keskimääräistä hieman viileämpi ja sadanta oli normaali. Kesällä 1988 touko- ja kesäkuu olivat hieman normaalia vähäsa-

Taulukko 1. Kuusen vuotuinen pituuskasvu mittattuna esimerkkiaineiston kaadettujen puiden latvasta. Ikä tarkoittaa puiden ikää kaatoajankohdasta. Mittaaja sulussa.

Aineisto	Puita, kpl	Vuotuinen pituuskasvu, cm																						
		1972	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	
1 Tuusula, Ruotsinkylä, koemetsikön noin 60-vuotiaita valtapuita (Lähde)	78									51	54	51	54	48	41									
2 Tuusula, Ruotsinkylä, koemetsikön noin 80-vuotiaita valtapuita (Lähde)	35							19	18	16	19	20	21	20	21	18	16							
3 Jokioinen ja lähimpäristö, 20 hakkuualaa (M. Juhonsalo)	512											39	37	36	25	15								
4 Jokioinen ja lähimpäristö, 21 hakkuualaa (M. Juhonsalo)	1519													43	33	24	30	19						
5 Jokioinen, Kuuma, 80–120-vuotiaita MT-kuusikon valtapuita (M. Juhonsalo)	17	30	28	29	25	29	28	26	25	26	22	25	23	23	20	12	14	7						
6 Jokioinen ja lähimpäristö, kahdeksan hakkuualaa (M. Juhonsalo)	409													39	31	23	29	22	13					
7 Suomensjärvi, MT-metsikön tielinjan noin 40-vuotiaita valtapuustoa (Laiho)	16														37	22	31	27	17					
8 Suomensjärvi, MT-metsikön tielinjan noin 90-vuotiaita valtapuustoa (Laiho)	11															25	14	23	15	7				
9 Parkanon tutkimusalue, MT-koemetsikön 30–50-vuotiaita lumituhon- ja harvennuspoustoa (Laiho)	71														29	26	20	26	22					
10 Silinjärvi, OMT-metsikön tielinjan 30–50-vuotiaita valtapuustoa (Laiho)	24																56	43	38	29				
11 Vilppula, MT-metsikön 50–60-vuotiaita valtapuustoa (Lähde)	75									46	46	39	38	41	41	44	34	35	25	18	33	31	25	
12 Oulainen ja lähimpäristö, kahdeksan hakkuualaa (A. Juhonsalo)	212																24	23	21	20	17	16	18	12

Taulukko 2. Mäännyn vuotuinen pituuskasvumittattuna esimerkkiaineiston kaadetujen puiden laivasta. Selitys ks. taulukko 1.

Aineisto	Puita, kpl	Vuotuinen pituuskasvu, cm																					
		1972	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93
1 Tuusula, Ruotsinkylä, koemetsikön noin 80-vuotiaita valtapuita (Lähde)	6	22	17	16	17	17	16	15	14	14	15	16	16	16	16	13	14						
2 Jokioinen ja lähiympäristö, kahdeksan hakkuualaa (M. Juhonsalo)	231											35	36	34	29	23							
3 Jokioinen ja lähiympäristö, viisi hakkuualaa (M. Juhonsalo)	50														54	46	44	38	42	33			
4 Jokioinen ja lähiympäristö, kahdeksan hakkuualaa (M. Juhonsalo)	183																		27	28	25	24	
5 Parkano, erittakenteisen MT-sekametsikön harvennuspuitoa (Laiho)	25														38	27	31	32	36	27			
6 Viippula, MT-metsikön 55–60-vuotiaita valtapuitoa (Lähde)	7								45	47	44	45	49	41	44	41	42	48	42	40	44	42	
7 Oulainen ja lähiympäristö, kahdeksan hakkuualaa (A. Juhonsalo)	220												23	22	20	21	18	17	15	14	14	12	

teisempia, mutta heinäkuu oli sateinen. Alkukesä oli lämmin. Kesä 1989 oli sademäärältään keskiarvoinen ja hieman normaalia lämpimämpi. Helmi- ja maaliskuu olivat lauhoja. Kesä 1990 oli lämpötilaltaan keskimääräinen. Alkukesä oli keskimääräistä kuivempi, mutta koko kasvukauden sadanta oli lähellä 55-vuotiskauden keskiarvoa. Kesä 1991 oli sadannaltaan normaali. Alkukesä oli hieman keskimääräistä kylmempi. Edeltänyt talvi oli lämpöoloiltaan normaali.

Ei voida kuitenkaan suoralta kädeltä sanoa, mistä syystä hyvä tai huono kasvu kulloinkin johtuu. Vaikuttavia tekijöitä on monia, ja pituuskasvu sekä paksuuskasvu ovat, kumpikin omalla tavallaan, niiden yhteisvaikutuksen tulos (Mikola 1950). Nykyisin ovat kasvuun vaikuttavina tekijöinä lisäksi ilmansaasteet. Mikolan v. 1950 julkaisema aineisto on ajalta ennen mainittavaa saastekuormitusta. Huomionarvoista lienee, että kuivuus ei siinä tule juuri lainkaan esiin kuusen kasvu rajoittavana tekijänä. Päinvastaiseen näkemykseen päädytään vuodet 1950–1993 kattavassa tutkimuksessa (Mielikäinen 1996) viimeisten 10 vuoden touko–kesäkuun sademäärän ollessa vuosilustoindeksin keskeinen selittäjä.

Pituuskasvumittaukset esitetään tässä yhteydessä ilman ikäkorjausta. Ilvessalon (1965) mukaan mäännyn ja kuusen kasvu alenee ikävuosien 30–90 välillä Etelä-Suomen mustikkatyypillä 0,2–0,3 cm vuodessa. Ikäkorjaus selittäisi kuusen pituuskasvun nyt todetusta alenemisestä kuitenkin vain murto-osan. Luotettavat indeksit edellyttäisivät myös tätä aineistoa pitempiä aikasarjoja. Tällaisia sarjoja on runsaasti puiden paksuuskasvusta (Laitakari 1920, Mikola 1950). Sääolojen muutokset aiheuttavat vuosilustoindeksiin satunnaista ja jaksottaista vaihtelua. Esimerkiksi hyönteistuhot ja puun aseman muuttuminen metsikössä aiheuttavat lisävaihtelua. Pitkällä aikavälillä puut kuitenkin näissä tapauksissa yleensä toipuvat tuhoista tai muutoksista ja kasvu saavuttaa indeksin keskimääräisen tason.

Uuteen tilanteeseen joudutaan, kun ilmansaasteet vaikuttavat pysyvästi puiden kuntoon. Tällöin puut kasvavat eri nopeudella kuin varhemmin vastaavissa oloissa. Kun muutos tapahtuu hitaasti ja asteittain sitä ei perinteisin menetelmin voitane erottaa iän mukaisesta puiden kasvun muutoksesta. Nopean muutoksen varmistuminen pysyväksi vaa-

Taulukko 3. Latvuksen kunnoltaan erilaisten puiden pituuskasvu 70-vuotiaassa kuusikossa. Jokioinen, Kuuma. Mittaaja M. Juhonsalo.

Latvuksen kunto	Puita, kpl	Pituuskasvu, cm		Suhteellinen pituuskasvu			
		1983	1983	1984	1985	1986	1987
Lievää värivikaa	75	34	100	96	95	63	40
Lievää värivikaa ja neulasvajausta	36	31	100	91	95	64	35
Vahvaa värivikaa, neulasvajausta ja pihkavuotoa	43	34	100	96	86	62	28

tisi puolestaan pitkäkhön seuranta-ajan. Tässä tilanteessa pitäisi indeksoida ilmastolliset kasvutekijät siten, että voidaan laskea, miten eri puulajien esim. kosteudeltaan erilaisilla kasvupaikoilla tulisi normaalisti kasvaa. Mallit tarvitaan myös siitä, miten puut ilmansaasteiden pitkäään rasittamisissa nykyoloissa vastaavasti kasvavat. Kun puut nyt käytettyvät – niin kuin näyttää – toisin kuin perinteisesti, on aihetta vakavasti epäillä ilmansaasteiden muuttaneen maaperää, heikentäneen myös suoraan ilman kautta puiden terveydentilaa tai molempia. Ilman eri vaikutusten erottelua käy niin, että puiden kasvun häiriöt selittyvät entistäkin paremmin pelkästään sääolosuhteilla.

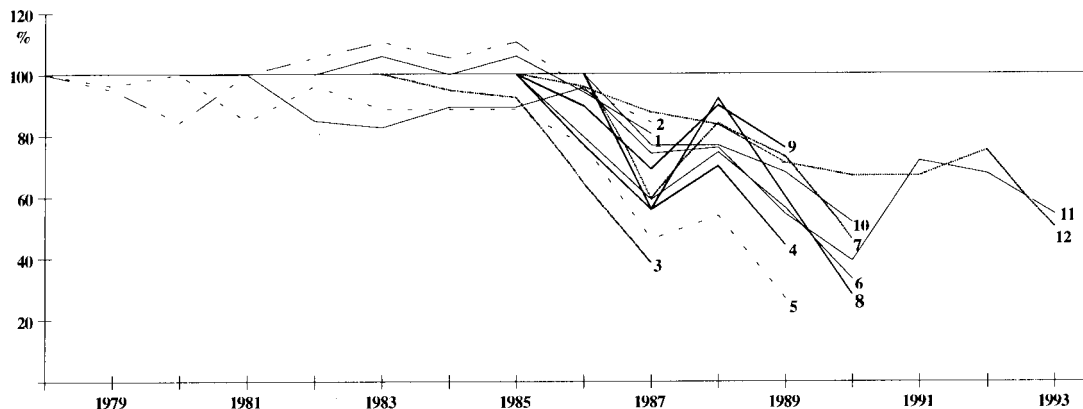
Säänvaihtelu ja kuusen klimatologinen sopeutuminen

Metsäkuusen alalaji euroopankuusi (*Picea abies* subsp. *abies*) vaatii kasvukauden aikana hieman enemmän lämpöä esimerkiksi lämpösommana mitattuna kuin tunturikoivu, pihlaja, pohjoisimmat pajulajit tai metsämänty. Euroopankuusen vuosikasvaimet ovat myös herkkiä alkukesän halloille. Siksi hallaisuutta ja viileää kasvukautta paremmin kestävä alalaji siperiankuusi (*Picea abies* subsp. *obovata*) on levinnyt ilmastollisesti ankarampiin oloihin ja muodostaa pohjoisen havumetsänrajan jo Kuolan niemimaalta alkaen aina Länsi-Siperiaan asti (Hämet-Ahti ym. 1989). Jäämeri pysyy jään peittämänä miltei mantereeseen asti niin Euroasian kuin Pohjois-Amerikan puolella pitkälle kesään. Tuulen kääntyessä pohjoiseen voi eteläpuoleisella mantereella vielä juhannuksen aikoihin olla erittäin kylmiä, hallaisia jaksoja. Sen sijaan lännenpänä, missä Norjanmeri ja Barentsinmeri pysyvät läpi vuoden sulana, hallariski on selvästi pienempi ja euroopankuusi on levinnyt pohjoisem-

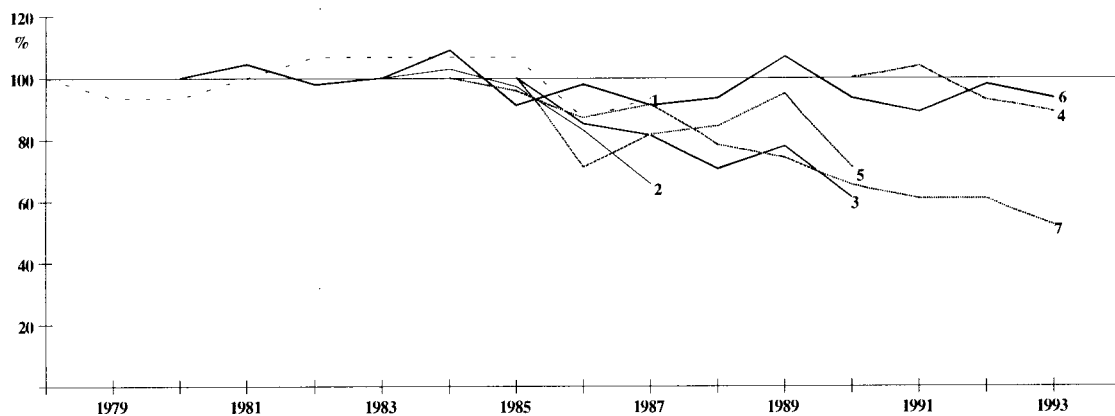
maksi. Siperianlehtikuusi (*Larix sibirica*) kasvaa Koillis-Venäjällä ja Länsi-Siperiassa rinnan siperiankuusen kanssa. Itä-Siperian ankarien pakkasten ylläpitämää ikiroutaa eivät nämäkään siedä siinä määrin kuin dahurianlehtikuusi (*Larix gmelinii*), joka muodostaa havumetsänrajan Lenajoen itäpuolella.

Kuusen luontaisen levinneisyyden rajoja kuvataan tässä tarkastelussa tiettyjen ilmastomuuttujien avulla. Niitä muuttujien arvoja, jotka vastaavat kuusen luontaisen levinneisyyden rajoja, sanotaan raja-arvoiksi. Etelään päin kuusen levinneisyyttä rajoittaa kaksi tekijää. Kuusi ei siedä suurta kuivuutta. Raja asettuu siihen, missä kesä on niin pitkä ja lämmin sekä haihdunta niin suurta, että kuusi ei saa tarpeeksi vettä. Toisaalta kuusen pitää kokea riittävän jyrkkä lämpötilanlasku syksyllä, jotta se talveentuisi kunnolla. Euroopankuusen leviäminen Suomeen ja sen nykyinen levinneisyys Euroopassa sopivat varsin hyvin yhteen sen kanssa, että kuusi, nimenomaan sen talveentuminen, vaatii keskimäärin 18°C:n suuruisia lämpötilan vuosiamplitudia Pohjoismaissa eli vuoden lämpimimmän ja kylimmän kuukauden keskilämpötilojen keskimääräistä eroa (Solantie 1983). Pienimmillään amplitudi voi jäädä yksittäisinä vuosina 13 asteen vaiheille. Laajoilta alueilta Länsi-Eurooppaa kuusi puuttuu, vaikka hies- ja rauduskoivu sekä mänty menestyvät. Alaskan länsirannikon sitkankuusi kasvaa sensijaan mereisisissäkin oloissa, joissa euroopankuusi vain kituu tai kuolee, kuten esimerkiksi Islannissa.

Kuivuus ja lämpötilan vuosiamplitudi rajaavat yhdessä varsin hyvin kuusen luontaisen esiintymisen länsi- ja etelärajan. Heinäkuun keskilämpötila indikoi kuivuutta, koska lämminkesäisessä ilmastossa potentiaalinen haihdunta on suurempi kuin viileäkesäisessä ilmastossa. Amplitudin raja-arvo



Kuva 1. Kuusen suhteellinen pituuskasvu vuosina 1978–1993 eri esimerkkiaineistojen mukaan. Mittausjakson ensimmäinen pituuskasvu on merkitty sadalla. Aineistot ks. taulukko 1.



Kuva 2. Männyn suhteellinen pituuskasvu vuosina 1978–1993 eri esimerkkiaineistojen mukaan. Mittausjakson ensimmäinen pituuskasvu on merkitty sadalla. Aineistot ks. taulukko 2.

Ar ($^{\circ}\text{C}$) kasvaa heinäkuun keskilämpötilan $T(7)$ raja-arvon $Tr(7)$ kasvaessa suunnilleen siten, että kuusen lounaisrajalla

$$Ar = 1,23 \times Tr(7) - 1,2$$

Kuusen länsirajalla Trondheimin–Bergenin alueella Norjassa $Tr(7) = 14,5^{\circ}\text{C}$ ja $Ar = 16,5^{\circ}\text{C}$. Levinneisyysrajalla Veikselin keskijuoksulla taas $Tr(7) = 18,5^{\circ}\text{C}$ ja $Ar = 21,5^{\circ}\text{C}$. Venäjällä ja Ukrainassa amplitudi ei ole enää rajoite, vaan ainoastaan kesän

kuivuus: kuusi menestyy lähelle aron rajaa, missä heinäkuun keskilämpötila on noin 20°C . Keski-Euroopan vuoristoissa taas sataa kesällä niin paljon, että kuusi menestyy ilmastossa, jossa amplitudi on pari astetta pienempi kuin em. yhtälön mukaan. Kuukausisadannan kasvu 20 mm:llä alamaista vuoristoon siirryttäessä vastaa yhtä suurta haihdunnan vähenemää eli maan vesivarastojen kasvua kuin keskilämpötilan nousu noin $1,7^{\circ}\text{C}$:lla (Solantie 1974). Se taas vastaa yllä olevan yhtälön mukaan 2°C :ta amplitudissa. Kuusimetsäisillä Tuk-

Taulukko 4. Talvikauden kuukausittaiset keskilämpötilat vv. 1979–1995 Jokioisten sääasemalla sekä kausien 1931–95, 1931–79 ja 1980–95 keskiarvot hajontoineen.

Talvi	Marraskuu	Joulukuu	Tammikuu	Helmikuu	Maaliskuu
1979–80	0,8	-5,2	-9,3	-9,5	-6,6
1980–81	3,8	-3,7	-5,1	-6,9	-6,9
1981–82	-0,4	-7,2	-11,2	-6,3	-0,4
1982–83	3,1	-1,0	-2,0	-8,9	-3,6
1983–84	-2,4	-3,6	-5,4	-5,4	-5,4
1984–85	0,8	-2,3	-16,5	-16,2	-2,6
1985–86	-2,0	-7,0	-8,8	-12,6	-1,0
1986–87	3,4	-8,3	-18,9	-7,9	-6,8
1987–88	-0,7	-5,3	-3,1	-4,3	-3,5
1988–89	-3,9	-7,0	-0,5	0,0	1,1
1989–90	-0,1	-5,9	-4,0	0,9	1,0
1990–91	-1,9	-1,6	-3,6	-7,5	-1,0
1991–92	2,6	-1,6	-2,1	-2,7	0,4
1992–93	-1,8	0,1	-2,3	-3,4	-0,9
1993–94	-3,6	-3,4	-4,8	-13,9	-3,2
1994–95	-1,0	-0,4	-3,6	-1,0	-0,3
1931–95	-0,3 ± 2,1	-4,2 ± 3,3	-7,0 ± 4,3	-7,3 ± 4,1	-3,7 ± 2,8
1931–79	-0,2	-4,2	-7,3	-7,5	-4,1
1980–95	-0,9 ± 2,4	-4,2 ± 2,9	-6,3 ± 5,3	-6,6 ± 4,9	-2,5 ± 2,8

holman seudun, Smålandin ja Baijerin alueilla amplitudi on vain noin yhden asteen raja-arvoa korkeampi. Amplitudi on niin lähellä raja-arvoa, että peräkkäisten lauhojen talvien jaksolla kuuset saattavat kärsiä. Siksi viime aikojen lauhat talvet voivat olla osaltaan vaikuttamassa Smoolannin lounaisreunan kuusikoiden huonokuntoisuuteen. Koska talvien odotetaan lämpenevän enemmän kuin kesien, voivat näiden alueiden kuusikot tuhoutua muutamassa vuosikymmenessä. Skoonessa, Tanskassa sekä Elben ja Veikselin välisellä alueella ja vieläpä Skotlannissa amplitudi jää vain hieman alle vaatimustason, minkä vuoksi viljelykuusikot ovat jotenkin menestyneet siellä luontaisen levinneisyysalueensa ulkopuolella. Ilmaston lämpeneminen aiheuttaa niille suuria vaikeuksia.

Etelä- ja Keski-Suomi ovat ilmastollisesti euroopanpuksen ydinaluetta, niin että kaikkiin em. rajoihin nähden on runsaasti vaihtelunvaraa. Seuraavassa tarkastellaan esimerkkinä keskellä Lounais-Suomea sijaitsevan Jokioisten ilmasto-oloja kautena 1980–1995 ja 1931–1995 kuusen menestymisen kannalta. Merkitään maksimiarvoja M:llä, minimi-

arvoja m:llä ja keskiarvoja ka:lla tarkasteltavan suureen tunnuksen jälkeen suluissa. Koska talven kylmin kuukausi vaihtelee usein vuodesta toiseen ja kesän lämpiminkin kuukausi joskus, ovat keskilämpötilan pitkäaikaisista keskiarvoista lasketut amplitudit A yllä olevassa yhtälössä noin 2°C pienemmät kuin yksittäisten vuosien amplitudien keskiarvot A(ka). Lämpötilan vuosiamplitudille A saadaan Jokioisissa kausina 1931–1995 ja 1980–1995 (vuosiluvut kesän mukaan, suluissa arvon jälkeen) seuraavat arvot (°C):

	A(M)	A(m)	A(ka)	A
1931–1995	35,2 (1986)	18,2 (1974)	25,5	23,6
1980–1995	35,2 (1986)	19,3 (1991)	25,0	22,8

Kauden 1980–1995 pienin amplitudi oli vasta kolmas 55 vuoden sarjassa, ja se oli klimatologista raja-arvoa (noin 18,8°C) suurempi. Tänä kautena amplitudi ei siten ole ollut kriittinen minään vuonna. Jokioisten ilmasto-olot poikkeavat paljon kuusen lounaisrajan oloista Etelä-Ruotsissa, missä Ar on noin 19,5°C ja missä amplitudi on ollut pienim-

Taulukko 5. Kasvukautinen sadanta (mm) Jokioisten sääasemalla vv. 1980–95 sekä kausien 1931–95, 1931–79 ja 1980–95 keskiarvot hajontoineen.

Kasvukausi	Toukokuu	Kesäkuu	Heinäkuu	Elokuu	Syyskuu	Touko–kesäkuu	Touko–syyskuu
1980	20	131	36	76	58	151	321
1981	19	115	104	88	15	134	341
1982	71	25	84	111	67	96	358
1983	44	84	41	58	86	128	313
1984	66	113	91	69	77	179	416
1985	43	41	55	119	51	84	309
1986	52	11	65	110	102	63	340
1987	38	81	68	83	120	119	390
1988	44	25	128	79	85	69	361
1989	41	30	85	92	51	71	299
1990	22	20	85	90	62	42	279
1991	29	69	55	92	80	98	325
1992	7	25	47	107	59	32	245
1993	1	56	107	136	13	57	313
1994	34	66	1	54	105	100	260
1995	87	121	53	65	45	208	371
1931–95	36,6 ± 19,6	46,2 ± 27,7	72,9 ± 37,8	79,2 ± 32,2	62,8 ± 27,6	82,8 ± 36,3	297,7 ± 63,4
1931–79	35,9	40,6	74,1	75,9	61,3	76,5	287,8
1980–95	38,6 ± 23,0	63,3 ± 40,4	69,1 ± 31,6	89,3 ± 22,9	67,3 ± 29,7	101,9 ± 49,0	327,6 ± 45,7

millään 14°C talven kylmimmän kuukauden keskilämpötilan ollessa tällöin +3°C.

Kaudella 1931–1995 Jokioisten ylin talven kylmimmän kuukauden keskilämpötila oli –2,7°C talvella 1991–92 (taulukko 4). Toiseksi ylin keskilämpötila oli –3,2°C ja se ajoittui talveen 1948–49. Vastaavasti kauden 1931–1995 kylmin kuukausi oli tammikuu 1987, jolloin keskilämpötila oli –18,9°C. Pakkaset vuoden 1987 alussa olivat etelärannikolla vuosisadan kovimmat, mutta kuitenkin lähellä entisiä ennätyksiä. Keski-Suomessa pakkasennätyksiä ei saavutettu.

Keskimääräinen kasvukauden (touko–syyskuu) sadanta oli kautena 1931–1995 Jokioisissa 298 mm ja kautena 1980–1995 328 mm. Vastaavat arvot alkukesästä touko–kesäkuussa olivat 83 ja 102 mm (taulukko 5). Viimeksi kulunut 16-vuotiskausi oli siten sateisempi kuin sitä edeltänyt kausi 1931–1979. Kauden 1931–1995 kasvukausista (touko–syyskuu) vähäsateisin oli v. 1947, jolloin sadanta (P) oli 145 mm. Kesä 1947 oli myös koko 55-vuotisjakson kolmanneksi lämpimin. Toinen hyvin vähäsateinen ja kuuma kesä oli v. 1941. Näinä vuosina haihdunta oli suurta ja maan vesivarasto-

jen väheneminen kesän aikana voimakasta. Maan kosteusvarastojen kuivuminen oli samaa luokkaa kuin metsän ja aron rajoilla keskimääräisinä vuosina. Niinpä kausina 1941–1942 ja 1947–1948 Saimaan pinta on ollut alimmillaan koko yli satavuotisen mittaussarjan aikana. Kaikkiaan viitenä kasvukautena sadanta jäi alle 200 mm:n. Kauden 1980–1995 vähäsateisin kasvukausi 1992 (P = 245 mm) oli vasta 13. sijalla. Jos rajoitetaan tarkastelemaan pelkästään alkukesää eli touko–kesäkuuta, oli v. 1992 55-vuotiskauden toiseksi vähäsateisin (P = 32 mm). Vielä vähäsateisempi alkukesä oli v. 1941, jolloin lisäksi heinäkuu oli koko 55-vuotiskauden kuumin. Viime aikoina ei siis ole ollut ennätysellisen kuivaa.

Seuraavaksi tarkastellaan, miten harvinaisia kauden 1980–1995 keskiarvot Jokioisissa olivat tilastollisesti pitkäaikaisen perusilmaston muihin 16-vuotiskeskiaarvoihin nähden. Arvioita tehtäessä oletetaan, että yksittäiset kuukausiarvot ovat toisistaan riippumattomia, normaalisti jakautuneita satunnaismuuttujia, keskiarvoinaan kauden 1931–1979 keskiarvot ja hajontoinaan kauden 1931–1995 vuosittaisten arvojen hajonnat. Tällöin 16-vuotis-

keskiarvojen keskiarvot olivat yhtä suuria ja samoin hajonnat jaettuina neliöjuuri 15:llä. Talvi ja sen kuukaudet, maaliskuuta lukuunottamatta, olivat kauden 1980–1995 keskilämpötiloiltaan melko tavallisia: ne eivät kuuluneet kylmimpiin eivätkä lämpimpiin kymmenyksiin. Maaliskuut olivat sen sijaan lauhjoja. Alle 5 % maaliskuun 16-vuotiskeskiaarvoista oli vielä korkeampia. Kautena 1980–1995 touko–syyskuut sekä erityisesti touko–kesäkuut olivat keskimäärin aika runsassateisia. Alle 5 % perusilmaston touko–syyskuun ja touko–kesäkuun sadantojen 16-vuotiskeskiaarvoista oli vielä suurempia. On kuitenkin muistettava, että suurimmassa osassa Etelä- ja Keski-Suomea touko–kesäkuun ja touko–syyskuun sadannat kasvoivat kaudesta 1931–1979 kauteen 1980–1995 vähemmän kuin Jokioissa.

Etelä-Pohjanmaalla sääolot ovat noudatelleet varsin hyvin Jokioisten havaintosarjoja. Ylistaron säähavaintoasemalla tammikuu 1987 oli myös jakson kylmin kuukausi. Vuodesta 1931 lähtien kasvukausi 1947 oli sielläkin vähäsateisin ($P = 154$ mm). Kaudella 1980–1995 pienin sadanta oli 216 mm v. 1982. Kuukausikeskilämpötilojen amplitudi oli pienimmillään $19,7^{\circ}\text{C}$ v. 1974. Kauden 1980–1995 minimiarvo $19,8^{\circ}\text{C}$ oli miltei sama.

Ilmasto ei ole siten kaudella 1980–1995 ollut mereisyytensä, kuivuutensa tai pakkastensa puolesta poikkeava verrattuna koko tarkastelujaksoon 1931–1995. Kauden sekä keski- että ääriarvot sijoittuvat hyvin normaalin tilastollisen vaihtelun rajoihin. Ilmastonmuutosta ei ole ainakaan vielä todettavissa havaintosarjoissa. Kuusen olemassaolo metsäpuuna on vakavasti uhattuna vasta silloin, jos ilmasto muuttuu samaksi mitä se on nykyään Elben ja Veikselin välillä. Toleranssia on Jokioisissa heinäkuun keskilämpötilassa 2°C ja tammikuun keskilämpötilassa 4°C sekä amplitudilla ilmaistuna 2°C . Näin suurta ilmastonmuutosta ei ole odotettavissa seuraavan sukupolven eli 30 vuoden aikana. Syyt kuusen viime aikaisiin oireiluihin on etsittävä muualta kuin ilmastosta. On kuitenkin huomattava, että Lounaissaaristossa kuusi joutuu ensimmäisenä Suomessa vaikeuksiin ilmaston lämmitessä. Alue on niin vähäsateinen, että em. yhtälön vakiotermi on $-1,2^{\circ}\text{C}$:n sijasta $-0,5^{\circ}\text{C}$. Tämä merkitsee sitä, että kuusi joutuu uhatuksi, kun heinäkuun keskilämpötila nousee $0,5^{\circ}\text{C}$ ja tammikuun keskilämpö-

tila $1,0^{\circ}\text{C}$. Silloin lähestytään kuusettoman Gotlannin nykyilmastoa. Tämä saattaa tapahtua parin seuraavan vuosikymmenen kuluessa.

Neulasten soluvauriot ja ilmansaasteet

Ilmanlaadun mittaukset osoittavat, että useimpien epäorgaanisten ilmansaasteiden pitoisuus ja laskeuma ovat korkeimmillaan eteläisessä Suomessa. Vain rikkilaskeuma on selvästi pienentynyt vuodesta 1980 lähtien. Sadeveden sulfaattirikkipitoisuus ylittää edelleen Vaasa–Lappeenranta-linjan eteläpuolella vuodessa 700 mg/m^2 (Ympäristökatsaus 3/1995). Vastaavasti nitraattitypen laskeuma on yli 350 mg/m^2 vuodessa. Ammoniakkia haihtuu ilmaan karjanlannasta, väkilannoitteista ja teollisuudesta. Sen aiheuttama ympäristökuormitus on suurinta Lounais-Suomessa ja Pohjanmaan rannikkoalueella (Kauppi ym. 1990). Rikkidioksidin ja typenoksidien pitoisuudet alittavat kasvillisuuden kannalta kriittisinä pidetyt arvot ja ovat muutaman mikrogramman luokkaa kuutiometrissä ilmaa (Pihlström ja Myllyvirta 1995). Lyhytaikaisina esiintyvät korkeat rikkidioksidin pitoisuudet ovat kuitenkin kasvillisuusvaurioiden kannalta merkityksellisempiä kuin vuosikeskiarvot (Sutinen ja Koivisto 1994). Varsinkin talviaikaan Etelä-Suomessa esiintyy edelleen ajoittain korkeita rikkidioksidin pitoisuuksia (Pihlström ja Myllyvirta 1995).

Kasvilajien ja lajiyksilöiden herkkyys otsonivaurioille vaihtelee (Pääkkönen 1996). Siksi käytössä on erilaisia raja-arvoja. Yleensä vuorokausikeskiarvon kriittisenä rajana pidetään 65 g/m^3 . Otsonipitoisuudet ylittävät sen keväisin ja alkukesästä lähes päivittäin koko Suomessa (Laurila ym. 1995). Otsonilla on selvä vuodenaikaisvaihtelu. Korkeimmat pitoisuudet, keskimäärin 90 g/m^3 , esiintyvät maaliskokuussa, koska alailmakehään talven aikana kertyneet typpi- ja hiilivety-yhdisteet muodostavat keväturingossa tehokkaasti otsonia ja valitsevat lounaistuulet tuovat sitä myös Keski-Euroopan päästöalueilta. Kesällä otsonitaso pysyy edelleen korkeana eteläisellä rannikkoalueella, mutta alenee sisämaassa kohti syksyä Kasvukauden aikana sen pitoisuushuippuja muodostuu lämpimällä pilvettömällä ja heikkotuulisella säällä, jolloin korkeimmat arvot kohoavat yli $150\text{ }\mu\text{g/m}^3$ (Laurila ja

Lättilä 1994). Otsonipitoisuus on 1950-luvun jälkeeseen noussut noin prosentin vuodessa. Kesäkuun keskimääräisen pitoisuustason on arvioitu kaksinkertaistuneen pohjoisella pallonpuoliskolla ja lähes kolminkertaistuneen Euroopassa (Laurila ym. 1995).

Solutasolla otsonin aiheuttama muutos näkyy ensin viherhiukkasten pienenemisenä (Sutinen ym. 1990) ja sitten alentuneen yhteytystoiminnan seurauksena (Wallin ym. 1990) mm. tärkkelyksen määrän vähenemisenä (Sutinen ja Koivisto 1994). Juuristossa vaikutukset ilmenevät kasvun hidastumisena, hienojuuriston supistumisena ja mykoritsamuodostuksen häiriintymisenä (Keane ja Manning 1989, Chevone ym. 1990, Chappelka ja Chevone 1992). Kokonaisvaikutuksena otsonin on todettu heikentävän puiden kasvua, alentavan nettofotosynteesiä, ravinteiden kuljetusta juuristoon ja vedenkäytön tehokkuutta sekä toisaalta lisäävän pimeähengitystä, nopeuttavan lehtien ja neulasten vanhenemista ja heikentävän talveutumista (Krupa ja Manning 1988, Pye 1988, Kickert ja Krupa 1990, Chappelka ja Chevone 1992, Holopainen ym. 1992, Karlsson ym. 1995, Pääkkönen 1996).

Kevään ja kesän aurinkoisten päivien lukumäärä korreloi kertyneen otsonimäärän kanssa ja siten myös puille aiheutuneiden vaurioiden määrän ja rasiuksen kanssa. Nykyisin suositellaankin otsonin kriittisten tasojen määrittämistä kasvillisuuden saaman otsoniannoksen mukaan. Menetelmässä otetaan huomioon kasvukauden aikaiset, tietyn kynnysarvon ylitykset ja niiden kesto. Kumulatiivisen otsoniannoksen on todettu ennustavan kasvivaurioita paremmin kuin esimerkiksi otsonipitoisuuden pitkäaikaisten keskiarvojen (Laurila ym. 1995). Tämän vuoksi on johdonmukaista, että kevään ja alkukesän vähäsateisuus selittäisi puiden kasvun heikkenemistä sekä neulasten ja lehtien nopeutunutta vanhenemista ja ennen aikaista kellastumista, vaikka puut eivät kärsisi suoranaisesti kuivuudesta. Tosin otsonin haittavaikutuksiin kuuluu tekijöitä, jotka aiheuttavat juuriversosuhteen pienenemistä ja edistävät myös siten kuivuusstressiä. Korkea otsonipitoisuus on haitallisinta alkukesästä, koska nuorena lehdet ovat herkimmillään muutoksille (Krupa ja Manning 1988, Pääkkönen 1996).

Esimerkiksi vuonna 1992 otsonin kertyminen oli erityisen voimakasta alkukesästä. Se saavutti yli

8000 ppb h:n arvon (kynnys 40 ppb) Ähtärin mittausasemalla kesän loppuun mennessä (Laurila ym. 1995). Seuraavana vuonna otsonin kertyminen oli vielä edellisvuottakin nopeampaa. Keskimääräistä vähemmän aurinkoisen kesäkuun vuoksi kokonaiskertymä kasvukauden loppuun mennessä jäi kuitenkin pienemmäksi eli 6000 ppb h. Vuonna 1991 otsonin kertymä oli vain 1500 ppb h eli se oli selvästi alhaisin 1990-luvun alkupuoliskolla. Vuonna 1990 se oli 4000 ppb h.

Viimeaikaiset tutkimukset ovat osoittaneet, että epäorgaanisten ilmansaasteiden lisäksi puiden neulasia ja lehtiä vaurioittavat myös monet orgaaniset ilmansaasteet. Sellaisia ovat useat halogenoitunut hiilivedyt johdannaisineen sekä jotkin nitrofenolit (Frank ym. 1994). Tähän mennessä on tutkittu näistä eniten trikloorietikkahappoa (TCA), koska sen arvellaan indikoivan muiden vastaavanlaisten, mutta vaikeammin analysoitavien yhdisteiden esiintymistä erilaisissa elinympäristöissä ja koska se on tunnettu kasvimyrkky (Frank ym. 1992, 1994).

TCA:a muodostuu ilmassa pienimolekyylisistä klooratuista hiilivedyistä auringon valon vaikutuksesta (Frank 1991). Helposti haihtuvina niitä vapautuu ilmaan valmistuksen ja käytön eri vaiheissa monenlaisista teollisuuslaitoksista. Myös selluloosan kloorivalkaisun yhteydessä muodostuu kloorattuja hiilivetyjä ja TCA:a (Juuti ym. 1995). Trikloorietikkahappoa kulkeutuu kasvien pinnalle, josta osa imeytyy suoraan ja osa kulkeutuu ilmaraikojen kautta lehtiin ja neulasiin. Juuret ottavat tehokkaasti veden mukana maahan huuhtoutunutta TCA:a (Sutinen ym. 1995a). Lisäksi sen prekursorit voivat rasvaliukoisina imeytyä lehtisolukoihin, kiinnittyä niiden rasva-aineisiin ja muuttua auringon valon vaikutuksesta TCA:ksi (Frank 1991). Ainakin jotkin sen esiyhdisteistä ovat jo sinänsä kasveille haitallisia (Frank ym. 1994).

TCA keräytyy kasveissa aktiivisen kasvun alueille aiheuttaen kasvun heikkenemistä, epäsäännöllisyyttä silmujen muodostuksessa ja aukeamisessa, lehtien kellastumista, kuoliolaikkuja ja epäsäännöllistä muotoa (Ashton ja Grafts 1973). Muita oireita ovat lehtien vahakerroksen oheneminen sekä lisääntynyt vedenläpäisevyys ja kuivumisalttius (Plümacher ym. 1993). Havupuiden harsuuntumisen ja neulasten TCA-pitoisuuden välillä on todettu riippuvuutta (Frank ym. 1992, 1994, Norokorpi ja Frank

1995). Puuyksilöiden välillä on kuitenkin huomattavia herkkyyseroja ja monenlaiset ekologiset tekijät sekä samanaikaiset muut stressitekijät aiheuttavat suurta vaihtelua puiden TCA-vasteessa (Norokorpi ja Frank 1995).

Kokeellisissa altistuksissa männyn taimilla on havaittu, että TCA aiheuttaa viherhiukkasten ja niissä olevan tärkkelyksen määrän pienenemistä samaan tapaan kuin alailmakehän otsoni. Muutokset viittaavat TCA:n vaikuttavan haitallisesti neulasten fotosynteesiin (Sutinen ym. 1995a). TCA vaurioitti sumutteella altistetuissa taimissa myös neulasten ilmarakojen huulisoluja. Vaurioituneiden solujen määrä oli suhteessa neulasten TCA-pitoisuuteen. Lisäksi epidermisolujen koko pieneni (Sutinen ym. 1995b). Neulasten pintasolukon ohentuminen ja ilmarakojen vaurioituminen lisäävät todennäköisesti veden haihtumista puista, mikä voi aiheuttaa kuivuusstressiä.

Havupuiden neulasten TCA-pitoisuutta on tutkittu useilla paikkakunnilla eri puolilla Suomea (Frank ym. 1992, 1994, Norokorpi ja Frank 1995, Juuti ym. 1996). Pitoisuustason vaihteluväli on ollut 1–180 µg/kg (tuorepainosta), ja 90 % arvoista on ollut välillä 5–70 µg/kg kolmannen vuoden neulasissa. Eteläisestä Länsi-Suomesta TCA-pitoisuuksia on analysoitu Harjavallasta, Jämijärveltä, Janakkalasta ja Riihimäeltä. Mitään merkitseviä tasoeroja samanikäisten neulasten pitoisuudessa ei ole voitu todeta eri osissa Suomea (Juuti ym. 1994, 1996). Vain kloorivalkaisua käyttävien selluloosa-tehtaiden lähellä on mitattu suurempia TCA-arvoja verrattuna tausta-alueisiin (Juuti ym. 1995). Myös Keski-Euroopasta raportoidut tulokset ovat olleet samaa suuruusluokkaa kuin Suomessa todetut (Frank ym. 1994, Plümacher ja Schröder 1994). Tämä on todennäköisesti seurausta siitä, että pienimolekyyliset, haihtuvat hiilivedyt reagoivat yleensä hitaasti ilmassa ja kulkeutuvat siksi kauaksi päästölähteistä. Joidenkin kloorattujen hiilivetyjen viipymä ilmakehässä on kymmeniä vuosia (Frank 1991).

Havupuiden neulasista on eristetty muitakin kloorattuja tai fluorattuja etikkahappoja, joista mm. monokloorietikkahappo (MCA) on huomattavasti myrkyllisempi kasveille kuin TCA (Frank ym. 1994). Näiden yhdisteiden muodostuminen ja kulkeutuminen ovat todennäköisesti vastaavanlaisia

kuin TCA:lla. Orgaanisten, kasveille myrkyllisten ilmansaasteiden haitallisuus voi ilmetä jo pieninä pitoisuuksina, koska ne vaikuttavat myös hormoni-, entsyymien ja mitokondrioiden muutosten kautta (Frank ym. 1994). Halogenoitujen hiilivety-yhdisteiden käyttö ja päästöt ilmaan ovat voimakkaasti lisääntyneet viimeisen 20 vuoden aikana. Monien yhdisteiden pitkä viipymä ilmakehässä aiheuttaa lisäksi pitoisuuksien kumuloitumista (Frank 1991). Saasteista aiheutuvan yläilmakehän otsonikerroksen ohenemisen seurauksena ultraviolettisäteily voimistuu. Myös sen vaikutuksesta ilmakehän kemiallinen reaktiivisuus lisääntyy ja ilmassa syntyy entistä enemmän haitallisia hapettumistuotteita, kuten otsonia, vetyperoksidia ja em. etikkahappoja. Lisäksi UV-säteilyn suorat vaikutukset ovat haitallisia elolliselle luonnolle (Heikkinen ja Tirri 1995a, b, c).

Puiden ulkoisten oireiden perusteella ei aina voi olla varma vaurioiden perussyystä, sillä ne ovat yleensä useiden tekijöiden samanaikaisia ja/tai peräkkäisiä seurauksia (esim. Krupa ja Manning 1988, Chappelka ja Chevone 1992, Selldén ym. 1996). Näkyvin ja viimeisin vaurionaiheuttaja ei useinkaan ole vaurioprosessin varsinainen käynnistäjä. Siten monien ns. luonnollisten tekijöiden kuten kaarnakuoriais- ja versosurmatuhojen edellytyksenä on puiden kunnan huononeminen joidenkin muiden tekijöiden vaikutuksesta. Ilmansaasteet ovat jo pitkään heikentäneet puiden elinvoimaisuutta ja altistaneet ne seuraustuhoille. Vaikka rikkipäästöjen määrää on voitu vähentää, maan ja vesien happamoitumisprosessit jatkuvat (Alhonen 1995). Niiden seuraukset rasittavat myös metsäpuita.

Neulasten ja lehtien soluvaurioiden tutkiminen valo- ja elektronimikroskoopilla paljastaa monia vaurioiden aiheuttajia. Määrittämisen perusteet on selvitetty kokeellisin tutkimuksin. Mikroskooppisesti voidaan tunnistaa esimerkiksi pakkasen, kuivuuden ja ravinnepuutosten aiheuttamat oireet ja erottaa ne tunnetuimpien ilmansaasteiden, mm. otsonin, happaman sateen ja rikkidioksidin aiheuttamista vaurioista (Holopainen ym. 1992, Sutinen ja Koivisto 1994, Palomäki ym. 1995, Pääkkönen 1996, Wulff 1996). Vaikka metsässä useat tekijät vaikuttavat samanaikaisesti, pahimmat vaurionaiheuttajat ovat kuitenkin yleensä erotettavissa vihreiden lehtien ja neulasten solurakenteissa.

Eri puolilla Etelä-Suomea (mm. Itä-Uusimaa, Lahden ja Mikkelin seudut, Itä- ja Lounais-Häme, Satakunta ja Etelä-Pohjanmaa) viimeisen kymmenen vuoden aikana otetuista neulasnäytteistä tehdyt mikroskooppiset määriykset osoittavat ilmaansaasteiden aiheuttamia, useimmiten ajan myötä pahentuneita vaurioita eri ikävaiheessa olevista vihreistä eli elävistä neulasista. Näytteenottoaika-kunnasta ja ajankohdasta riippumatta pääasiallisimpina vaurionaiheuttajina ovat olleet otsoni, hapan sade ja rikkidioksidi (Sutinen 1990, 1991, 1995, Sutinen ja Koivisto 1990, 1991, Sutinen ja Mäenpää 1994). Vain eri saastukkeiden vaikutusaste on vaihdellut aluettain. Pakkasen tai kuivuuden aiheuttamia soluvaurioita ei ole todettu. Säävaihtelut eivät ole tutkittuna ajanjaksona olleetkaan niin ääreviä, että niiden aiheuttamat oireet olisivat olleet todennäköisiä. Sen sijaan ravinnepuutosoireita mm. typen osalta on todennettu yksittäistapauksina paikallisesti. Ravinnepuutos on kuitenkin voinut olla seurausta esimerkiksi maan happamoitumisesta hapan sateen vaikutuksesta, vaikka toisaalta vuodesta toiseen jatkuvalla typpilaskeumalla on myös lannoittava vaikutus.

Useiden kokeellisten tutkimusten perusteella on päädytty siihen, että pohjoiset havupuut kestävät seuraavia lämpötiloja: neulas -70°C , silmut -70°C , runko $-50^{\circ}\text{C} \dots -70^{\circ}\text{C}$ ja juuristo $-20^{\circ}\text{C} \dots -35^{\circ}\text{C}$ (Sakai ja Larcher 1987). Kestävyys paranee pohjoiseen päin ja jälkimmäiset luvut edustavat pohjoisimpia alkuperiä. Eräiden havupuiden on todettu kestävän yli -120°C :n pakkasia. Juurisienten on todettu kestävän rihmastona $-40 \dots -192^{\circ}\text{C}$:n pakkasen (Sakai ja Larcher 1987). Niinpä useat tutkijat ovat todenneet, että normaalisti karaistuneet havupuut kestävät hyvin alimmatkin Fennoskandiaviassa esiintyvät lämpötilat (Sakai 1982a,b, Sakai ja Eiga 1985, Nilsson ja Andersson 1987).

Tutkimuksissa on havaittu, että ilmansaasteet heikentävät mm. puiden pakkasensietokykyä (Barnes ja Davison 1988). Toisaalta tiedetään, että Etelä-Suomessa esimerkiksi otsonin ja aiemmin myös hapan sateen määrät ovat toistuvasti ylittäneet ne raja-arvot, jotka puiden on arvioitu vaurioitumatta kestävän (Selldén ym. 1996). Ilmansaasteiden yhteisvaikutusten tai niiden ja ns. luonnollisten tekijöiden yhteisvaikutusten kestoarvoja ei juuri-kaan tunneta. Monissa kokeellisissa tutkimuksissa

on todettu, että yhteisvaikutusten raja-arvot ovat paljon yksittäisiä rajoja alempia. Esimerkiksi otsonin ja rikkidioksidin ja/tai typpidioksidin yhdistelmä on aiheuttanut huomattavasti suuremman puiden kasvun vähenemisen kuin mikään saastuke yksinään (Kress ja Skelly 1982, Treshow ja Anderson 1989, Chappelka ja Chevone 1992).

Yhteenvedo

Metsien terveydentilan muutoksia on yleensä seurattu arvioimalla puiden harsuuntumista eli neulas- ja lehtikadon määrää. Se ei kuitenkaan anna tarkkaa kuvaa metsien tilaan vaikuttavista tekijöistä, koska neulas- ja lehtimassan määrää säätelevät sekä puun sisäiset että ympäristöstä johtuvat tekijät. Harsuuntumisen silmävarainen arviointi on myös jossain määrin subjektiivista. Terveydentilan seurauksissa harsuuntuminen ja kasvun taantuminen ilmentävät menneitten vuosien tilannetta, jolla on kuitenkin tärkeää informaatioarvoa.

Puiden pituuskasvu indikoi herkemmin olosuhteiden muutoksia kuin paksuuskasvu, joka kuitenkin on keskeinen tilavuuskasvuun vaikuttava muuttaja ja jota käytetään yleensä kasvuindeksien laadinnassa. Esimerkinomaiset kuusen pituuskasvun mittaukset osoittavat, että kasvu on kääntynyt laskevaan suuntaan eteläisessä Suomessa 1980-luvun puolivälin jälkeen. Männyn pituuskasvussa ei näytä tapahtuneen yhtä säännönmukaista heikkenemistä. Kuusella on ollut keskimääräistä tiheämmin ja runsaampia käpysatoja, mutta tulokset osoittavat, että sekä runsaskäpyisten että lähes kävyttömien kuusten pituuskasvu on kääntynyt samalla tavoin laskuun. Voimakkain muutos näyttää tapahtuneen vuoden 1986 jälkeen eli kasvua heikentäneet tekijät ovat vaikuttaneet silmun muodostumisvaiheessa kesällä 1986 tai jo ennen kasvukauden alkua. Samantapainen kielteinen kehitys on jatkunut koko 1980-luvun lopun ja 1990-luvun alkupuoliskon. Valtakunnan metsien inventointitulokset vahvistavat näitä havaintoja, sillä niiden mukaan Etelä-Suomen metsien kasvu on kääntynyt laskuun.

Puiden kunnan huononemisen on arveltu olevan seurausta liian kuivasta keväästä tai kesästä. Säätilastot eivät tue tätä käsitystä. Kuusi kasvaa keskimääräistä tuoreemmillä kasvupaikoilla, joilla puus-

ton rakenne, pintakasvillisuus ja humuskerros suojaavat tehokkaasti juurikerrosta haitalliselta kuivumiselta. Sen sijaan monien ilmansaasteiden, kuten otsonin ja halogenoitujen hiilivety-yhdisteiden aiheuttamalla vaurioilla on yhtäläisyyksiä kuivuusstressin oireiden kanssa sen lisäksi, että ne heikentävät puiden vesitalouden säätelyä, veden ottoa, kuljetusta ja käyttöä sekä lisäävät haihdutusta. Mänttujen saasteiden pitoisuushuiput ajoittuvat juuri lämpimiin ja aurinkoisiin sääjaksoihin.

Myös talvisten olojen on esitetty olleen kuusen elinvoimaisuutta rasittavia etenkin Lounais-Suomessa. Kuusen talvilepo olisi jäänyt lyhyeksi tai häiriintynyt liian lauhjojen talvien seurauksena, jolloin lisääntynyt hengitystoiminta olisi kuluttanut energiavarastoja haitallisessa määrin. Siten kuusen lounaisen ja läntisen levinneisyysrajan olot olisivat alkaneet vallita jo Lounais-Suomessa. Säätilastot eivät tue käsitystä, että Varsinais-Suomen talvi olisi alkanut vastata ilmastollisesti Etelä-Ruotsin Skånen oloja. Lisäksi kuusen kunto on heikentynyt kauempanakin sisämaassa. Sen sijaan on tiedossa, että monet Keski-Euroopasta asti leviävät ilmansaasteet, kuten otsoni, kuormittavat eteläistä Länsi- ja Lounais-Suomea muuta maata voimakkaammin. Vaurioiden seurauksena mm. viherhiukkaset pienenevät, puiden yhteytystoiminta heikkenee ja siten myös kertyvät energiavarastot jäävät tervettä kehitystä pienemmiksi. Vaurioitunut neulassolukko lisää puiden hengitystoimintaa ja alentaa osaltaan niiden energiatasetta. Viimeisen runsaan kymmenen vuoden aikana, jolloin erityisesti kuusten kasvu on kääntynyt laskuun, ei ole ollut myöskään poikkeuksellisen kylmiä sääjaksoja, jotka olisivat voineet vaurioittaa normaalisti talveutuneita terveitä puita. Vastaavanlaisia ääreviä säitä on ollut aiemminkin ilman, että ne olisivat aiheuttaneet vakavaa haittaa kuusen kasvulle tai suorastaan kuolemista.

Lukuunottamatta usein tilapäisesti vaikuttavia korkeita pitoisuuksia, ilmansaasteet aiheuttavat harvoin välitöntä, nopeaa puiden tuhoutumista. Luonnossa erilaiset räsitusmekanismit vaikuttavat yhtä aikaa ja peräkkäin altistaen puita seuraustuhoille. Vaurioituneilla ja heikentyneillä puilla on alentunut vastustuskyky. Taudit ja tuhohyönteiset viimeistelevät yleensä heikentyneen puun kuoleamisen. Myös alttiut epäsuoteisille säätetekijöille lisääntyy.

Ilmansaasteista rikki on tunnetuin ja sen päästöjä on kyetty vähentämään niin, että rikkiyhdisteille herkäät naavamaiset jäkälät ovat alkaneet jossain määrin elpyä. Typpipäästöt ovat pysyneet vähintään entisellä tasolla ja alailmakehän otsonipitoisuus ylittää keväisin ja kesäisin selvästi kasvillisuuden kestävyysrajan. Yläilmakehässä puolestaan etenee otsonikerroksen oheneminen. Sen seurauksena maahan pääsee enenevästi eläville organismeille haitallista ultraviolettisäteilyä. Sen osuutta puiden vaurioihin ei tiedetä. Uutena todettuna ongelmana ovat halogenoidut, etenkin klooratut hiilivety-yhdisteet, joilla on samanlaisia vaikutuksia kuin tunnetuilla kasvimyrkyillä. Niitä on mitattu puiden lehdistä ja neulasista eri puolilta Suomea. Tutkimusten edetessä ilmakehästä näyttää löytyvän lisää kasveille haitallisia aineita.

On myös otettava huomioon, että kasvihuoneilmion voimistuminen etenee. Se on nyttemmin alan tutkijoiden hyväksymä käsitys. Ilmaston muutokseen liittyy säiden vaihtelun voimistumista ja äärevöitymistä. Saastevaikutusten tukemana säätetekijät ja luonnolliset tuhonaiheuttajat vaikuttavat entistä haitallisemmin puiden kuntoon.

Yksi tarkimmista puiden kunnon ja siihen vaikuttavien tekijöiden tutkimusmenetelmistä on valoja elektronimikroskopia vihreitten neulasten ja lehtien solukoista. Ilmansaasteet ja ns. luonnolliset tekijät aiheuttavat niissä tietynlaisia vaurioita ja muutoksia. Solutason analyysit ovat osoittaneet, että 1980-luvun loppupuolella alkaneissa seuranta-tutkimuksissa on löydyntä toistuvasti vaurioituneita männyn ja kuusen neulasia. Oireiden aiheuttajiksi on määriteltä ensisijaisesti otsoni, hapan sade ja rikkidioksidi.

Vaikka puiden tuhoutuminen on yleensä eri tekijöiden yhteisvaikutuksen tulos, on todettuun laajaan oireiluun todennäköisesti yksi yhteinen perussyy eli ilmansaasteet. Erityisesti kuusten kunnon ja kasvun heikentymisen syiden tutkiminen esimerkiksi solutasolla on tärkeää ja kiireellistä, vaikka tutkimustyöllä ongelmaa ei voidakaan ratkaista. Edellytys tuhojen vähenemiselle on, että ilmansaasteita vähennetään voimakkaasti. Metsien monimuotoisella hoidolla, mm. puuston runsasta lehtipuusekoitusta ja erirakenteisuutta suosimalla voitaneen hidastaa tuho vaikutuksia. Huonokuntoisimmat, tyvilahon vaivaamat kuusikot tulisi käsitellä

ensisijaisesti. Kituvat puut tulisi korjata ennen niiden kuolemista ja taloudellisen arvon putoamista. Tämä edellyttää poimintahakkuita ja metsän jatkuva tarkkailua.

Kirjallisuutta

- Alhonen, P. 1995. Moreenimaiden happamoituminen. *Lounais-Hämeen Luonto* 82: 4–7.
- Ashton, F.M. & Crafts, A.S. 1973. Mode of action of herbicides. John Wiley & Sons, New York. 504 s.
- Barnes, J.D. & Davison, A.W. 1988. The influence of ozone on the winter hardiness of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). *New Phytologist* 108: 159–166.
- Chappelka, A.H. & Chevone, B.I. 1988. Growth and physiological responses of yellow-poplar seedlings exposed to ozone and simulated acid rain. *Environmental Pollution* 49: 1–18.
- Chevone, B.I., Seiler, J.R., Melkonian, J. & Amudson, R.G. 1990. Ozone-water stress interactions. *Julkaisussa: Alscher, R.G. & Gunning, J.R. (toim.). Stress responses in plants: adaptation and acclimation mechanisms*. A. John Wiley & Sons, New York–Chichester–Brisbane–Toronto–Singapore.
- Frank, H. 1991. Airborne chlorocarbons, photooxidants, and forest decline. *Ambio* 20: 13–18.
- , Scholl, H., Sutinen, S. & Norokorpi, Y. 1992. Trichloroacetic acid in conifer needles in Finland. *Annales Botanici Fennici* 29: 263–267.
- , Scholl, H., Renschen, D., Rether, B., Laouedj, A. & Norokorpi, Y. 1994. Haloacetic acids, phytotoxic secondary air pollutants. *Environmental Science and Pollution Research* 1: 4–14.
- Heikkinen, R.P.S. & Tirri, R. 1995a. Otsonikato ja ultraviolettisäteilyn biologiset vaikutukset 1. Otsonikato ja ultraviolettisäteilyn lisääntyminen. *Luonnon Tutkija* 99(3): 80–83.
- & Tirri, R. 1995b. Otsonikato ja ultraviolettisäteilyn biologiset vaikutukset 2. Ultraviolettisäteilyn vaikutus solun hienorakenteeseen. *Luonnon Tutkija* 99(4): 132–136.
- & Tirri, R. 1995c. Otsonikato ja ultraviolettisäteilyn biologiset vaikutukset 3. Ultraviolettisäteilyn vaikutus eliöihin ja eliöyhteisöihin. *Luonnon Tutkija* 99(5): 162–165.
- Holopainen, T., Anttonen, S., Wulff, A., Palomäki, V. & Kärenlampi, L. 1992. Comparative evaluation of the effects of gaseous pollutants, acidic deposition and mineral deficiencies: structural changes in the cells of forest plants. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 42: 365–398.
- Hämet-Ahti, L., Palmén, A., Alanko, P. & Tigerstedt, P.M.A. 1989. Suomen puu- ja pensaskasvio. *Dendrologian Seura*. Helsinki. 290 s.
- Ilvessalo, Y. 1956. Suomen metsät vuosista 1921–24 vuosiin 1951–53. Kolmeen valtakunnan metsien inventointiin perustuva tutkimus. Summary: The forests of Finland from 1921–24 to 1951–53. The survey based on three national forest inventories. *Communications Institutii Forestalis Fenniae* 47(1). 227 s.
- 1965. Metsänarvioiminen. WSOY. 400 s.
- Juuti, S., Sutinen, S., Norokorpi, Y., Repo, M. & Ruuskanen, J. 1994. Trikloorietikkahapon esiintyminen ympäristössä ja vaikutukset havupuihin. Tutkimusraportti. Kuopion yliopisto, ympäristötieteiden laitos. 38 s.
- , Norokorpi, Y. & Ruuskanen, J. 1995. Trichloroacetic acid (TCA) in pine needles caused by atmospheric emissions of kraft pulp mills. *Chemosphere* 30: 439–448.
- , Norokorpi, Y., Helle, T. & Ruuskanen, J. 1996. Trichloroacetic acid in conifer needles and arboreal lichens in forest environments. *The Science of the Total Environment* 180: 117–124.
- Karlsson, P.E., Medin, E.-L., Wickström, H., Sellden, G., Wallin, G., Ottosson, S. & Skärby, L. 1995. Ozone and drought stress-interactive effects on the growth and physiology of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.). (painossa).
- Kauppi, P., Anttila, P., Karjalainen-Balk, L., Kenttämies, K., Kämäri, J. & Savolainen, I. 1990. Happamoituminen Suomessa. HAPROn loppuraportti. Ympäristöministeriö, Sarja A 89. 89 s.
- Keane, K.D. & Manning, W.J. 1989. Effects of ozone and simulated acid rain on birch seedling growth and formation of ectomycorrhizae. *Environmental Pollution* 52: 55–65.
- Kickert, R.N. & Krupa, S. 1990. Forest responses to tropospheric ozone and global climate change: an analysis. *Environmental Pollution* 68: 29–65.
- Kress, L.W. & Skelly, J.M. 1982. Response of several eastern forest tree species to chronic doses of ozone and nitrogen dioxide. *Plant Disease* 66: 1149–1152.
- Krupa, S.V. & Manning, W.J. 1988. Atmospheric ozone: formation and effects on vegetation. *Environmental Pollution* 50: 101–137.
- Kuusela, K. & Salminen, S. 1991. Suomen metsävarat 1977–1984 ja niiden kehittyminen 1952–1980. Summary: Forest resources of Finland in 1977–1984 and their development in 1952–1980. *Acta Forestalia Fennica* 220. 84 s.

- Kuusen luontainen uudistaminen tänä vuonna epävarmaa, mutta jo nyt kannattaa varautua hyödyntämään männyn ensi vuoden runsas siemensato. Metsäntutkimuslaitos. Tiedote 3.2.1996. 1 s.
- Laitakari, E. 1920. Tutkimuksia sääsuhteiden vaikutuksesta männyn pituus- ja paksuuskasvuun. Referat: Untersuchungen über die Einwirkung der Witterungsverhältnisse auf den Längen- und Dickenwachstum der Kiefer (*Pinus silvestris*). Acta Forestalia Fennica 17(1). 57 s.
- Laurila, T. & Lättilä, H. 1994. Surface ozone exposures measured in Finland. *Atmospheric Environment* 28: 103–114.
- , Lättilä, H. & Anttila, P. 1995. Otsoni. Julkaisussa: Tikkanen, E. (toim.). Kuolan saastepäästöt Lapin metsien rasitteena. Itä-Lapin metsävaurioprojektin lopporaportti. s. 61–65.
- Mielikäinen, K. 1996. Kasvun vaihtelu ja kasvutrendit Euroopassa. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 589: 6–15.
- Mikola, P. 1950. Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvututkimuksissa. Summary: On variations in tree growth and their significance to growth studies. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 38(5). 131 s.
- Lindgren, M. & Salemaa, M. 1994. Metsiemme elinvoima. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 527: 11–24.
- Nilsson, J.-E. & Andersson, B. 1987. Performance in freezing tests and field experiments of full-sib families of *Pinus silvestris* (L.). *Canadian Journal of Forest Research* 17: 1340–1347.
- Norokorpi, Y. 1990. Talviekologiset tekijät ja puiden terveydentila. Julkaisussa: Varmola, M. & Palviainen, P. Lapin metsien terveys. Metsäntutkimuspäivät Rovaniemellä 1989. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 347: 76–80.
- & Frank, H. 1995. Trichloroacetic acid as a phytotoxic air pollutant and dose-response relationship for defoliation of Scots pine. *The Science of the Total Environment* 160/161: 459–463.
- Palomäki, V., Rantanen, L. & Holopainen, T. 1995. Neulasten hienorakennetutkimus neulasvaurioiden syiden tunnistuksessa. *Luonnon Tutkija* 99(4): 126–131.
- Pihlström, M. & Myllyvirta, T. 1995. Ilman epäpuhtauksien leviämisen ja vaikutustutkimus Itä-Uudellamaalla, Lahden seudulla, Mikkelin läänissä ja Joutsassa 1994–1995. Tutkimusraportti. Itä-Uudenmaan ja Porvoon vesien- ja ilmansuojeluyhdistys, Porvoo. 96 s. + 6 liit.
- Plümacher, J., Renner, I. & Schröder, P. 1993. Volatile chlorinated hydrocarbons and trichloroacetic acid in conifer needles. Julkaisussa: Schröder, P., Frank, H. & Rether, B. (toim.). Volatile organic pollutants: Levels, fate and ecotoxicological impacts. Proceedings of the 2nd IMTOX-workshop, 10–11 December 1992, Garmisch-Partenkirchen, Germany. Schriftenreihe des Faunhofer-Instituts für Atmosphärische Umweltforschung 23: 37–51.
- & Schröder, P. 1994. Accumulation and fate of C1/C2-chlorocarbons and trichloroacetic acid in spruce needles from an Austrian mountain site. *Chemosphere* 29: 2467–2476.
- Puuston kasvu hidastunut selvästi Etelä-Suomessa. Metlan tutkijat puhuvat huomattavasta muutoksesta. Kaleva 5.2.1996.
- Pye, J.M. 1988. Impact of ozone on the growth and yield of trees: a review. *Journal of Environmental Quality* 17: 347–360.
- Pääkkönen, E. 1996. Ozone – complex risk for birch. Kuopio University Publications C. Natural and Environmental Sciences 42. 42 s. + 5 liit.
- Sakai, A. 1982a. Extraorgan freezing of primordial shoots of winter buds of conifers. Julkaisussa: Li, P.H. & Sakai, A. (toim.). Plant cold hardiness and freezing stress. Nide 2. Academic Press, New York. s. 199–209.
- 1982b. Freezing tolerance of shoot and flower primordia of coniferous buds by extraorgan freezing. *Plant & Cell Physiology* 23(7): 1219–1227.
- & Eiga, S. 1985. Physiological and ecological aspects of cold adaptation of boreal conifers. Julkaisussa: Kaurin, Å., Junntila, O. & Nilsen, J. (toim.). Plant production in the North. Norwegian University Press, Tromsø–Oslo–Bergen–Stavanger. s. 157–170.
- & Larcher, W. 1987. Frost survival of plants. Responses and adaptation to freezing stress. *Ecological Studies* 62. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York–London–Paris–Tokyo. 321 s.
- Satakunnan metsälautakunnan alueen metsävarat ja niiden kehitys 1952–1994. Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus 24.1.1996. 7 s.
- Sellén, G., Sutinen, S. & Skärby, I. 1996. Controlled exposures and field observations in Fennoscandia. Julkaisussa: Sanderman, H. Jr., Wellburn, A.R., Heath, R.L. (toim.). Forest decline and ozone: a comparison of controlled chamber and field experiments. *Ecological Studies*. Springer Verlag, Berlin–Heidelberg–New York. Painossa.
- Solantie, R. 1974. Kesän vesitaseen vaikutus metsä- ja suokasvillisuuteen ja linnustoon sekä lämpöolojen välityksellä maatalouden toimintaedellytyksiin Suomessa. *Silva Fennica* 8(3): 160–184.
- 1983. Miten kuusi menestyy ilmastollisesti: ennen, nyt ja tulevaisuudessa. *Metsä ja puu* 11–12/1983: 28–29.

- Sutinen, M.-L. 1995. Neulasten pakkaskestävyys. Julkaisussa: Tikkanen, E. (toim.). Kuolan saastepäästöt Lapin metsien rasitteena. Itä-Lapin metsävaurioprojektin loppuraportti. s. 138–140.
- Sutinen, S. 1990. Structural changes in needle tissue of spruce trees from a damaged stand in southern Finland. *Scandinavian Journal of Forest Research* 5: 403–412.
- 1991. Kuusen neulasten solurakennetutkimus Lahden Holmassa. Moniste. 5 s.
- 1995. Männyn neulasten solurakennetutkimus Itä-Uudellamaalla, Lahden seudulla, Mikkelin läänissä ja Joutsassa 1995. Julkaisussa: Pihlström, M. & Myllyvirta, T. (toim.). Ilman epäpuhtauksien leviämisen ja vaikutustutkimus Itä-Uudellamaalla, Lahden seudulla, Mikkelin läänissä ja Joutsassa 1994–1995. s. 45–56.
- & Koivisto, L. 1990. Männyn neulasten solurakennetutkimus Itä-Uudellamaalla. Moniste. 10 s.
- , Skärby, L., Wallin, G. & Sellden, G. 1990. Long-term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst. to ozone in open-top chambers. II. Effects on the ultrastructure of needles. *New Phytologist* 115: 345–355.
- & Koivisto, L. 1991. Kuusen neulasten solurakennetutkimus Hollolan kunnan Heinlammin kylän alueesta. Moniste. 6 s.
- & Koivisto, L. 1994. Soluvaurioiden diagnostiikka – kirjallisuuskatsaus. Julkaisussa: Mälkönen, E. & Sivula, H. (toim.). Suomen metsien kunto. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 527: 195–205.
- & Mäenpää, M. 1994. Granbarrens cellstruktur. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 543: 23–25.
- , Juuti, S., Koivisto, L., Turunen, M. & Ruuskanen, J. 1995a. The uptake and structural changes induced by trichloroacetic acid in the needles of Scots pine seedlings. *Journal of Experimental Botany* 46(290): 1223–1231.
- , Juuti, S., Koivisto, L., Turunen, M. & Ruuskanen, J. 1995b. Structural impacts of trichloroacetic acid on pine needles. Julkaisussa: Kämäri, J., Tolvanen, M., Anttila, P. & Salonen, R. O. (toim.). Proceedings of the 10th world Clean Air Congress. Espoo, Finland, May 28–June 2, 1995. Nide 3. Impacts and management. s. 420.
- Treshow, M. & Anderson, F. K. 1989. Plant stress from air pollution. John Wiley & Sons.
- Valtakunnan metsien 8. inventointi valmis. Tulokset ja vertailu aiempiin inventointeihin. Metsäntutkimuslaitos, lehdistötiedote 8.11.1995. 2 s.
- Vuokila, Y. 1980. Metsänkasvatuksen perusteet ja menetelmät. WSOY, Porvoo. 256 s.
- Wallin, G., Skärby, L. & Sellden, G. 1990. Long term exposure of Norway spruce, *Picea abies* (L.) Karst., to ozone in one-top chambers. I. Effects of maximum capacity of net photosynthesis, dark respiration and leaf conductance of shoots of different ages. *The New Phytologist* 115: 335–344.
- Wulff, A. 1966. Ultrastructural, visible and chemical indications of dry and wet deposited air pollutants in conifer needles. Kuopion yliopiston julkaisuja C. Luonnontieteet ja ympäristötieteet 41. 66 s. + liitt.
- Ympäristökatsaus 3/1995. Teemanumero: Ilma. Suomen ympäristökeskus. 20 s.