

Dendrokronologian menetelmiä ja sovellutuksia

OLAVI HEIKKINEN

Maantieteen laitos, Helsingin yliopisto

Heikkinen, Olavi (1984). Dendrokronologian menetelmiä ja sovellutuksia [Methods and applications of dendrochronology]. *Terra* 96: 1, pp. 1–22. English summary.

Dendrochronology, which studies tree rings for various purposes, has undergone rapid development in the past two decades. This may be attributed to the emergence of high-speed computers and the increase in interdisciplinary and international cooperation. Dendrochronological research has expanded its geographical coverage, widened its scope and refined its approaches. This article attempts to introduce the fundamentals of this burgeoning science, dealing with a wide range of methods and applications. The examples are mainly based on data collected by the author in the United States.

Olavi Heikkinen, Department of Geography, University of Helsinki, Hallituskatu 11–13, SF-00100 Helsinki 10, Finland.

Joskus dendrokronologialla ymmärretään puulustojen avulla suoritettavaa esineiden tai tapahtumien ajoittamista. Tosiasiassa dendrokronologian kenttä on tätä laajempi ja käsittää muun muassa ilmstollisten ja muiden ympäristöllisten muutosten jäljittämisen. Monissa maissa dendrokronologia luetaan jo itsenäiseksi tieteeksi. Tahdottaessa se voidaan jakaa useaan osa-alaan (Fritts 1976: 10). Niistä tärkein lienee dendroklimatologia, jonka pyrkimyksenä on paitsi menneiden ilmasto-olojen rekonstruointi myös nykyisen ilmaston ja puun kasvun välisten suhteiden tutkiminen (esim. Fritts 1971; Hughes ym. 1982). Dendrogeomorfologia on puolestaan dendrokronologian osa, joka käyttää puulustoja geomorfologisten prosessien ajoittamiseen. Tällä alalla ansaitsee maininnan suomalaisen Jouko Alestalon (1971) ulkomailla tajaan siteerattu väitöskirjatyö. Dendrokrono-

logian rungosta voidaan ehkä osoittaa vielä yksi näyttävä haara, dendrohydrologia, tieteenala, joka tutkii ajoitettuja puulustoja selvittääkseen ennen instrumentaalisia havaintoja tapahtuneita vesistöjen tulvimisia ja jokien virtaamavaihteluja. Tämä on mahdollista seuduilla, missä sekä puun kasvu että hydrologiset vaihtelut ovat erityisesti sadanasta riippuvaisia. Arizonan yliopiston puulustolaboratoriossa työskentelevän Charles Stocktonin ja hänen työtovereidensa tutkimukset dendrohydrologian saralla ovat saaneet suurta huomiota (esim. Stockton & Fritts 1973; Stockton & Bogges 1979; Smith & Stockton 1981).

Viime aikoina on maailmalla ilmestynyt muutamia erinomaisia puulustotutkimusta valottavia kirjoja. Amerikassa puolileikkiläisesti »dendrokronologien raamatuksi» kutsuttu Harold Frittsin (1976) teos *Tree rings and*

climate on eräs alan kirjallisuuden kulmakiviä. Toinen ja nopeasti arvostetuksi noussut kirja on Hughesin ja muiden toimittama *Climate from tree rings*. Teos pohjautuu johtavien dendrokronologien artikkeleihin, joiden sisältöä pohdittiin ja ruodittiin mm. suuressa alan kansainvälisessä kokouksessa Birminghamissa vuonna 1980. Teos antaa laadukkaan käsityksen puulustotutkimuksen periaatteista, sovellutuksista, tulevaisuuden näkymistä ja tutkimustyön alueellisesta edistymisestä maapallon eri osissa. Selkeä ja havainnollinen on myös sveitsiläisen Fritz Schweingruberin (1983) teos *Der Jahrring*. Äskettäin ilmestyi Arizonan Tucsonissa Tree-Ring Society'n julkaisemana englanniksi joukko neuvostoliittolaisia artikkeleita nimellä *Soviet publications in dendrochronology I* (toim. Valmore LaMarche Jr 1983). Tämä käännöstyö avartaa venäjää taitamattomien kuvaa idässä edenneestä tutkimustyöstä.

Artikkelin tarkoitus

Puulustotutkimuksen kärki on edennyt vauhdilla viimeisen 15–20 vuoden aikana. Nopeat tietokoneet ja eri tieteenalojen specialistien yhteistyö ovat tuottaneet näyttäviä tuloksia mm. Arizonan yliopiston puulustolaboratoriossa, josta on tullut dendrokronologien Mekka. Arvostusta ovat saaneet myös sveitsiläiset ja saksalaiset tutkijat. Ruotsalaisetkin ovat yrittäneet pysytellä kehityksen rintamassa. Suomalaisten metsien miesten tutkimusinto tai -mahdollisuudet ovat laantuneet. Liian harvat suomalaiset sitten Hustingin (esim. 1945 ja 1956), Mikolan (esim. 1950) ja Sirénin (esim. 1961) aktiivisimpien työvuosien ovat todella keskittyneet dendrokronologisiin tutkimuksiin.

Artikkelin päätarkoituksena on valottaa puulustotutkimuksen näkymiä siinä toivossa, että dendrokronologia alkaisi jälleen Suomessa nousta hyötynsä ja mahdollisuuksiensa mittaiseen arvoon. Tutkimuksiin liittyvät esimerkit on pyritty valitsemaan siten, että ainakin jotkut niistä puhuttelisivat ympäristöstään kiinnostuneita opiskelijoita ja opettajia ja että ainakin muutamat esimerkit yltaisivät osoittamaan sille tielle, jota uuden polven tiedemies näkisi haasteekseen edetä. Ehkäpä kirjoitus kiinnostaa kuviensa, kirjallisuusuuttelonsa ja englanninkielisen tekstinsä osalta myös niitä ulkolaisia dendrokronologian harrastajia, jotka ovat Terran tavoitettavissa.

Ensihavainnoista menetelmien moninaisuuteen

Paljon on tapahtunut puulustotutkimuksen alalla sitten vuoden 1737, jolloin nimekkäät ranskalaiset luonnontieteilijät Comte de Buffon ja Henri Duhamel huomasivat, että tietty hallan vaurioittama vuosilusto oli tunnistettavissa kaikissa erään seudun vastaakaadetuissa puissa. Tuo huomiota herättänyt lusto, 29. kaarnasta laskettuna oli muodostunut vuonna 1709 (Mosaic 1977). Vaikka mainittu ranskalaiset liitetään usein ensimmäisiin »lustotutkimuksiin», totuus on, että jo Leonardo da Vinci tarkasteli puulustoja ja oivalsi niiden leveyden vaihteluilla olevan yhteyden ilmaston muutoksiin (Hitch 1982).

Vähitellen puiden lustojen määrittäminen yleisty. Alussa lustolaskut rajoittuivat pelkästään eläviin puihin. Jotta kronologian ajallista ulottuvuutta voitiin jatkaa, oli pystyttävä liittämään yhteen perättäisten puusukupolvien lustosarjoja. Ennen pitkää tämä nykykäselle dendrokronologialle välttämätön »ristinajoittamisen» (engl. cross-dating) taito opittiinkin. Sen oivalsivat ensimmäisinä toisistaan riippumatta, niin sanotaan (esim. Fritts 1976: 6), A.C. Twining vuonna 1827 Connecticutissa, C. Babbage Englannissa vuonna 1838, J. Kuechler vuonna 1858 Teksassissa ja itse dendrokronologian isäksi sittemmin nimetty Andrew E. Douglass vuonna 1904 Arizonassa.

Dendrokronologiset tutkimukset ovat siten Douglassin esitöiden (esim. Douglass 1914) perustuneet pääasiassa vuosilustojen laskentaan ja leveyden mittaamiseen. Lustojen leveyden vaihteluista on tehty päätelmiä ilmastollisista ja muista ympäristöllisistä muutoksista. Eryyisesti puoliarideilla seuduilla kuten Lounais-Yhdysvalloissa luston leveydellä näyttää olevan varsin suora riippuvuus alueellisista ilmasto-oloista, tässä tapauksessa sademäärästä. Sen sijaan lauhkean ja viileän humideilla seuduilla kuten pääosassa Eurooppaa luston leveys näyttää kuvastavan paljolti myös paikallisia ilmastotekijöitä (Schweingruber ym. 1979).

Koko vuosiluston leveyden sijasta on dendroklimatologisissa tutkimuksissa joskus analysoitu erikseen luston kevät- ja kesäpuun leveyttä (Schweingruber ym. 1978). On todettu, että kevätpuun kuten koko vuosilustonkin leveys riippuu ainakin lauhkean ja viileän humidisissa oloissa huomattavasti edellisen tai edellisten vuosien kasvusta sekä mikroil-

mastosta. Sen sijaan kesäpuun tuotanto reagoi huomattavasti herkemmin myös mainituissa olosuhteissa kasvukauden makroilmastoon.

Viime aikoina on dendroklimatologiassa pyritty löytämään muitakin käyttökelpoisia lustojen ominaisuuksia kuin leveys. Uusista keinoista on epäilemättä lustojen tiheyden määrittäminen ollut tuloksekkain. Tuon menetelmän perusidea esitettiin ensi kerran jo lähes 20 vuotta sitten (Polge 1966). Lukuisista tiheydenmäärittämismenetelmistä on suositeltavin röntgendensitometrinen metodi (Schweingruber ym. 1978; 1979), vaikka senkin sovellutuksiin liittyy lukuisia vaikeuksia (Schweingruber 1982).

Erityisesti kesäpuun tiheys (paino/tilavuus) antaa usein lisätietoa nimenomaan luston muodostumisen aikaisista ilmasto-oloista. On annettu varsin seikkaperäisiä kuvauksia siitä, miten kunkin kuukauden tai vuodenajan ilmastolliset piirteet vaikuttavat kesäpuun tiheyteen eli luston maksimitiheyteen (Schweingruber ym. 1978). Subarktisella ja subalpiinisella alueella kesäpuun tiheyttä rajoittaa lähinnä kesän lämpötila, aridisilla seuduilla sademäärä. Kesäpuun tiheys ilmeisesti kuvastelee erityisen hyvin makrokliimaattisia kasvukauden aikaisia vaihteluja, minkä vuoksi se kuten myös kesäpuun leveys soveltuu varsinkin kesäisten lämpö- ja sadeolojen jäljittämiseen etenkin lauhkeassa ilmastossa ja kosteilla kasvupaikoilla, missä koko luston ja kevätpuun leveyden vaihtelut pyrkivät jäämään vähäisiksi (Fritts 1976: 44–46; Schweingruber 1982).

Esitettäköön pari esimerkkiä densitometrisin keinoin saaduista tuloksista. Parker ja Hensch (1971) osoittivat Kalliovuorten engelmänninkuusen (*Picea engelmannii*) lustojen maksimitiheydellä olevan voimakkaan korrelaation elokuun keskilämpötilan kanssa. Huber (1976) puolestaan osoitti, että männyn (*Pinus silvestris*) maksimitiheys riippuu Reinin yläjuoksulla kesän sademäärästä. Densitometrisen menetelmän käyttö on tulossa myös Pohjoismaihin.

Puulustoista analysoidaan myös eri alkuaineiden pysyvien isotooppien välisiä määräsuhteita paleokliimaattisten vaihtelujen selvittämiseksi. On nimittäin havaittu, että alkuaineiden pysyvien isotooppien suhde (deuterium/tavallinen vety eli D/H, $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) on puuaineksessa kuten monissa elottoman luonnon systeemeissä lämpötilasta riippuva. Tosin isotooppisuhteet näyttävät

muuttuvan puulustoissa tiettyssä määrin myös kosteuden ja sademäärän eikä vain lämpötilan funktiona. Orgaanisen aineksen kuten puuselluloosan isotooppisuhteiden riippuminen ilmastosta on joka tapauksessa monimutkainen ja toistaiseksi vaillinaisesti ymmärretty asia (Long 1982).

Pysyvien isotooppien käyttö dendrokronologiassa näyttää joltisenkin lupaavalta, vaikka edistyminen tällä saralla on kohdannut vaikeasti voitettavia esteitä (Gray 1981). Huolimatta lupaavista ja »teorian» mukaisista tuloksista (esim. Schiegl 1974; Epstein & Yapp 1976; Mazany ym. 1980; Burk & Stuiver 1981) monet huolellakin tehdyt tutkimukset antavat ristiriitaisia tuloksia (ks. Wigley 1982).

Hiilen radioisotoopin eli ^{14}C :n määrittäksiin perustuvat puulustoanalyysit ovat ainakin tällä hetkellä varmemmalla pohjalla kuin pysyvien isotooppien suhteiden tutkiminen. Tosin radiohiilianalyysien päämäärät eivät ole juuri dendroklimatologisia päinvastoin kuin pysyvien isotooppien tapauksessa vaan itse ^{14}C -ajoitusten oikeellisuuteen liittyviä.

Radioaktiivista ^{14}C -isotooppia syntyy kosmisen säteilyn vaikutuksesta ilmakehän yläosassa. ^{14}C :n muodostumista säätelevät monet seikat, mm. auringon aktiivisuus, jolla tarkoitetaan lähinnä auringonpilkkujen lukumääriä (esim. Heikkinen 1982). Muodostunut ^{14}C joutuu hiilen pysyvien isotooppien tavoin CO_2 :ksi hapettuneena yhteyttäviin kasveihin. Näin tietyn vuoden puulusto sisältää tiedon ilmakehän alaosan $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$ -suhteesta ja ^{14}C -määrästä kyseisenä vuonna. Vuosilustoon jouduttuaan ^{14}C alkaa haajaantua puoliintumisajan ollessa noin 5730 vuotta. Analysoimalla tunnetun ikäisten vuosilustojen ^{14}C -määrät voidaan rekonstruoida ilmakehän radiohiilipitoisuudet kyseisille vuosille ja saada näin tietoa ilmakehän ^{14}C :n tuotantomuutoksista ja tätä kautta myös auringonpilkkumäärien vaihteluista (Stuiver & Quay 1980). Tosin ^{14}C -tuotannossa tapahtuvat muutokset näyttävät ilmenevän puiden lustoissa muutaman vuosikymmenen viiveellä (Stuiver 1980).

Joskus auringonpilkkujen määrät ja tästä syystä myös puulustoista johdetut ilmakehän ^{14}C -vaihtelut on yhdistetty syyperäisesti maapallon ilmastollisiin vaihteluihin. On väitetty, että auringonpilkkujen määrän lisääntyminen kohottaa ilmakehän lämpötilaa ja lisää ehkä ukkossateita samalla kun se laskee ilmakehän ^{14}C -pitoisuutta. Auringonpilkkujen ilmastollista vaikutusta ei kuitenkaan ole

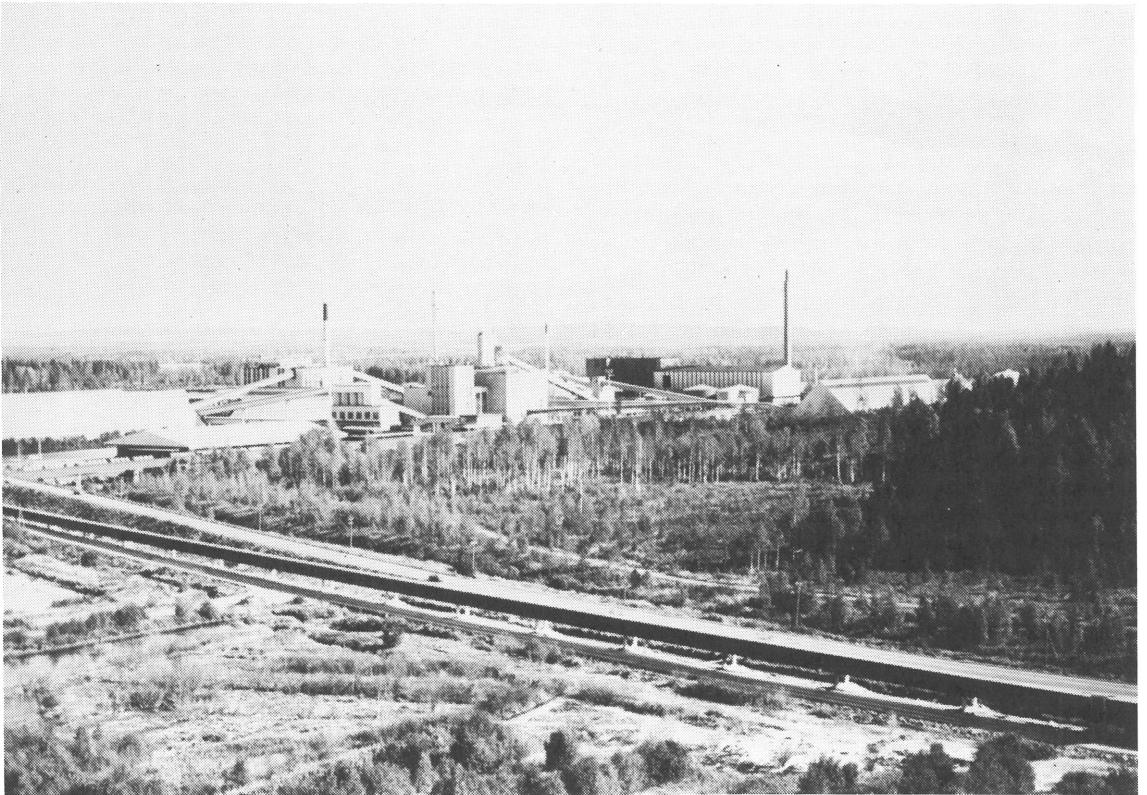
voitu kiistattomasti todistaa (Stuiver 1980; Heikkinen 1982).

Tärkein puulustoihin liittyvä radiohiilen käyttötapa on epäilemättä ikiä tuottavan radiohiilimenetelmän kalibrointi. On havaittu, että vanhojen puiden lustoista saadut radiohiili-iat poikkeavat usein huomattavastikin lustojen todellisesta iästä. Ikäerot ovat osoituksena siitä, että ilmakehän ^{14}C -määrä ei ole pysynyt vakiona vaan siinä on tapahtunut mm. auringon toiminnasta aiheutuneita varsin pitkäaikaisiakin heilahteluja. Tämä merkitsee sitä, että ajoitettavat orgaaniset näytteet (turve, lieju, jne.), joiden ikäero saattaa olla vuosisatoja, voivat saada radiohiiliajoituksissa samoja ikiä (Suess 1980).

Radiohiilimenetelmän kalibrointi on tapahtunut Yhdysvalloissa vihnemännyn (*Pinus*

longaeva) avulla. Tuo vähäsateisilla vuorilla kasvava puu voi saavuttaa yli 4000 vuoden iän ja on siksi sovelias pitkien puulustosarjojen rakentamiseen. Vihnemännyn yhtenäinen lustosarja ulottuu yli 8000 vuotta nykypäivästä taaksepäin. Lähes koko tältä ajalta on olemassa myös vihnemännyn lustoista saatu radiohiilikronologia (Suess 1980). Euroopassa on tammi näytellyt pääosaa pitkien lustosarjojen rakentamisessa ja radiohiili-ikien kalibroinnissa (Becker 1980).

Dendrokronologinen tutkimus pyrkii löytämään alati uusia keinoja. Ilmastollista tietoa yritetään saada tutkimalla mm. puulustojen aminohappoja (Mosaic 1977). Myös puusulun anatomista rakennetta on analysoitu esimerkiksi Pohjois-Saksan tammista (Eckstein ym. 1977; Eckstein & Frisse 1982). Eri-



Kuva 1. Kemira Oy:n Siilinjärven lannoitetehtaat Pohjois-Savossa aloittivat toimintansa vuonna 1969. Varsinkin havupuut ovat herkkiä tuotantolaitoksen päästöille kuten rikkidioksidille. Tehtaiden ympäristön kuolleet ja pahoin vaurioituneet kuuset hakataan pois saasteita paremmin sietävien lehtipuiden tieltä. Kirjoittajan ottama kuva vuodelta 1980.

Fig. 1. The Kemira Oy fertilizer factory at Siilinjärvi in eastern Finland was opened in 1969. Conifers in particular are sensitive to its pollutants, especially to sulphur dioxide. Dead and seriously damaged spruces around the factory have been felled to provide room for deciduous trees which are more resistant. Photographed by the author in 1980.

tyisesti luston muodostumisvuoden sademäärä näyttää tulevan esille tämän tyyppisissä tutkimuksissa. Arvioitaessa ihmisen toiminnan vaikutusta ympäristön tilaan puulustoista voidaan tehdä alkuainemäärityksiä. Analyysit lyijyn, elohopean, kadmiumin, sinkin, kuparin tai arseenin pitoisuuksista saatavat osoittaa, missä määrin ja missä ajassa teollistuneen maailman saasteet ovat lisääntyneet menneisyyden perustasoon nähden.

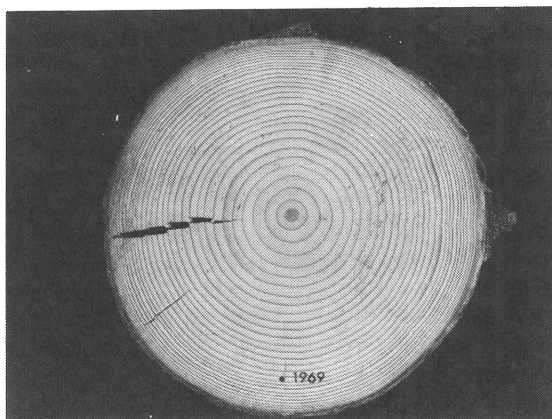
Mitä puulustotutkimuksilla selvitetään?

Edellä annettiin jo viitteitä dendrokronologian monista mahdollisuuksista. Tämä luku erittelee nimenomaan puulustotutkimusten sovellutuksia. Artikkelin loppuosassa perehdytään vielä seikkaperäisesti esimerkkien voimalla dendroklimatologisiin tutkimustuloihin.

Eräs dendrokronologisen tutkimuksen tehtävä on rakentaa pitkiä puulustosarjoja eli puulustokronologioita, joiden avulla voidaan tarkasti ajoittaa arkeologisesti kiinnostavia puuesineitä (esim. Robinson 1976) ja kontrolloida radiohiili-ikä. Lukuisia ilmastollisiin vaihteluihin kytkeytyviä luonnonilmiöitä on selvitetty puulustotutkimuksin. On rekonstruoitu esimerkiksi järvien muinaisia vedenpinnan muutoksia ja jokien menneitä virtaamavaihteluja (Stockton & Fritts 1973; Stockton 1981). Myös alpiinisten jäätiköiden liikkeitä menneinä vuosisatoina on kyetty jäljittämään melko luotettavasti lähiseudun puiden lustonleveyden perusteella (mm. Matthews 1977).

Ilmansaasteiden lisääntyvä vaikutus ilmenee näkyvästi erityisesti havupuiden heikkenä terveytenä ja ennenaikaisena kuolemisena. Ilman epäpuhtauksien vaikutusta puulustojen leveyteen ovat Suomessa tarkastelleet mm. Havas ja Huttunen (1972) sekä Heikkinen ja Tikkanen (1981). Tuoreita ja menetelmällisesti kiinnostavia artikkeleita ovat tuottaneet esimerkiksi Thompson (1981) Nevadasta ja Kienast (1981) Sveitsistä. Kuvat 1 ja 2 osoittavat vuonna 1969 käynnistettyjen Kemira Oy:n Siilinjärven tehtaiden vaikutusta lähiympäristönsä kuusimetsiin ja puun kasvuun.

Monet äkilliset katastrofaaliset luonnontapahtumat jättävät selvän merkkinsä puulustoihin (Alestalo 1971). Maanvieremät ja lumivyöryt haavoittavat usein puita jättäen ne kuitenkin ehkä henkiin. Tällöin romahtanut,



Kuva 2. Poikkileikkaus ilmansaasteiden riuduttamasta kuusesta (*Picea abies*), joka kasvoi noin 300 metrin päässä kuvassa 1 näkyvästä Siilinjärven tehtaista. Tehtaiden käynnistymisvuotta, 1969, vastaava lusto on merkitty puukiekkoon. Tuon vuoden jälkeiset lustot ovat keskimääräistä kapeampia. Vuosien 1979 ja 1980 lähes huomaamattomat vuosikasvut osoittavat, että puu olisi pian kuollut ilmansaasteisiin, ellei sitä olisi kaadettu heinäkuussa 1980.

Fig. 2. Cross-section from a Norway spruce (Picea abies) which grew about 300 m south of the factory shown in Fig. 1. The annual ring formed in 1969, the year in which the factory commenced operations, is indicated by a dot. The subsequent annual rings are seen to be narrower than average. The almost indiscernible rings for 1979 and 1980 suggest that even if the tree had not been felled in July 1980 it would soon have died from the effects of pollutants.

kenties epäsymmetriseksi muuttunut pakusuuskasvu mahdollistaa ympäristössä tapahtuneen muutoksen ajoittamisen (esim. Vesajoki 1978). Tosin melko hitaatkin rinteiden massaliikunnot voivat kuvastua puun epäkeskeiseksi käyneestä kasvusta. Hallat, tulvat sekä eoliset prosessit häiritsevät puun kasvua, mikä ilmenee normaalia kapeampien lustojen muodostumisena.

Rantojen puita kolhivat jäät ja edustansa metsiin työntyvät vuoristojäätiköt (Lawrence 1950) saattavat vioittaa pahoinkin puita. Kuva 3 esittää vuoristojäätikön puskeman morenivallin distaalilaidalla kasvavaa puuta. Etumaastonsa metsään edennyt jäätikkö kallisti ja haavoitti kuvassa olevaa puuta kesien 1886 ja 1887 välisenä aikana, mikä tulee esiin kasvun jyrkkänä vähenemisenä (kuva 4). Kuva 4 myös todistaa, että kyseinen jäätikön työntö kulminoitui talvikaudella 1886/87 (Heikkinen 1984).

Tulipalot (esim. Zackrisson 1977) ja tuhkaa kylvävät tulivuorten purkaukset (Yamaguchi 1982; LaMarche Jr. & Hirschboeck 1984) heikentävät hetkessä niiden puuyksilöiden elinehtoja ja kasvua, jotka ovat onnistuneet selviämään hengissä luonnontuholta. Myös hyönteiset ja kasvitautit aiheuttavat joskus huomattavaa kasvun heikkenemistä (Röthlisberger 1976). Tunturimittarin (*Oporinia autumnata*) laajat tunturikoivutuhot Lapissa vuosina 1965–66 (Kallio & Lehtonen 1973) ovat yhä vielä maisemallisestikin erottuvia.

Joskus puiden ikien määrittäminen vuosilustolaskuina saattaa paljastaa puiden lisääntymiselle otollisen ilmastollisen kauden. Esimerkiksi Kaskadivuorten metsänrajavyöhykkeessä kokivat monet subalpiiniset niityt voimakkaan metsittymisen 1920–1940-luvuilla (kuva 5). Samoihin aikoihin eteni metsänraja myös Lapissa (Hustich 1958). Nuo vuosikymmenet olivatkin harvinaisen lämpimiä koko pohjoisella pallonpuoliskolla.

Puun paksuuskasvu ja sitä säätelevät tekijät

Puiden kasvua olisi voitu tarkastella yleisellä tasolla jo artikkelin alussa. Mutta koska paksuuskasvu, vuosiluston tunnistaminen sekä kasvuun vaikuttavat tekijät tulevat esille kaikkein pelkistyneimpinä nimenomaan puun kasvun ja ilmaston välisten suhteiden selvittelyssä, asiaa pohditaan vasta nyt eli juuri ennen dendroklimatologisten tutkimusten esittelyä.

Talven ja kesän tai vuotuisen sadekauden ja kuivakauden säännöllisyys aiheuttavat puun toiminnoissa toistuvuuden, mikä ilmenee lustottaisena paksuuskasvuna. Varsinkin havupuiden lustot kehittyvät mainituissa ilmasto-oloissa selvärajaisiksi. Kukin lusto sisältää suurisoluisen ja vaalean kevät- eli varhaispuuosan sekä sen ulkopuolisen pienisoluisen, tummana näkyvän luston osan, jota nimitetään kesä- eli myöhäispuuksi. Yhdessä kevät- ja kesäpuu muodostavat vuosiluston (Fritts 1976; Heikkinen & Tikkanen 1981).

Joskus vuosilustojen määrittäminen ja ajoittaminen saattaa vaikeutua siksi, että puusta otettu näyte ei sisälläkään katkotonta sarjaa vuosilustoja. Tilanne on mahdollinen, koska jotkut puut eivät tuota kaikkina vuosina koko rungon laajuista vuosilustoa. Mikäli näytteitä otetaan kaikista rungon osista, puun jokaista elinvuotta edustavat lustot kyllä löy-

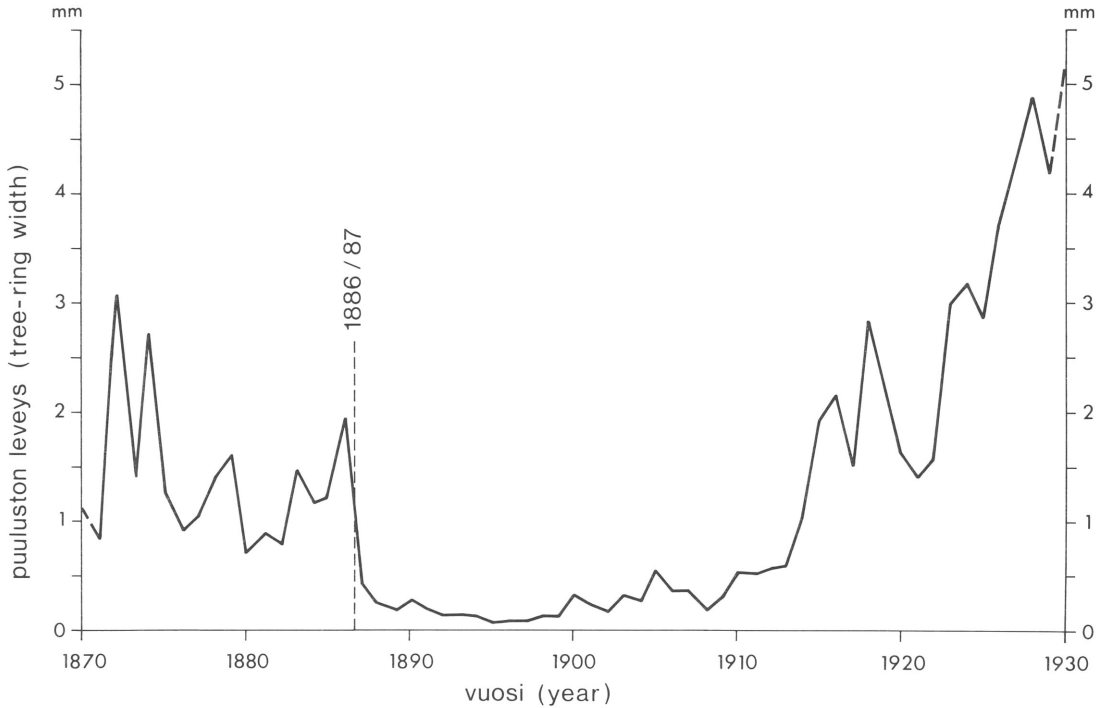


Kuva 3. Colemanin jäätikkö (Mount Baker, Washington, U.S.A.) on päätemoreenia rakentaessaan kallistanut ja vaurioittanut useita moreenin ulkolaidalla kasvaneita puita, mm. kuvassa vasemmalla olevaa purppurajalokuusta (*Abies amabilis*). Jäätikön kolhuilta hengissä säilyneiden puiden lustosarjat sisältävät tiedon vauriovuodesta; ks. kuva 4. Kirjoittajan kuva, 1. 7. 1982.

*Fig. 3. When building up this end moraine, the Coleman Glacier (Mount Baker, Washington, U.S.A.) tilted and damaged the Pacific silver fir (*Abies amabilis*) in the foreground of the photograph. Ring series from surviving damaged trees contain information on such events; see Fig. 4. Photographed by the author, July 1, 1982.*

tyvät sillä puu kasvaa koko elinaikansa. Vuosilustojen epätäydellisyys eli ns. puuttuvat lustot johtuvat osittain biologisista, osittain ulkoisista syistä. Vaikka vaillinaisen luston kasvaminen on melkoisessa määrin lajikohtainen ilmiö, ankarat kasvukauden olosuhteet kuten poikkeuksellinen kuivuus, halla tai tulipalot ovat myös yleisiä syitä luston paikalliseen puuttumiseen. Erällä eteläisen pallonpuoliskon puulajeilla paksuuskasvu tapahtuu erittäin epäsymmetrisesti, mistä syystä sama lusto voi olla jossakin rungon sektorissa hyvin leveä mutta saattaa kokonaan puuttua aivan viereiseltä rungon osalta (esim. Dunwiddie 1979). Suomalaisissa puulajeissa vuosikasvu on suhteellisen yhtäläistä kautta rungon.

Puunäytteen puuttuvien renkaiden eli epätäydellisten vuosilustojen paikallistaminen ja ajoittaminen on dendrokronologisessa tutkimuksessa ensiarvoisen tärkeää. Senpä vuoksi ei voida tyytyä pelkästään kussakin näytteessä erottuvien lustojen laskemiseen vaan on vertailtava keskenään niin samasta kuin eri puistakin otettuja lustosarjoja. Mikäli puista otettuja näytteitä on riittävästi, lustojen toisiinsa rinnastaminen, ns. ristiinajoitus,



Kuva 4. Lustonleveysdiagrammi kuvassa 3 näkyvän purppurajalokuusen jäätikön puoleiselta rungon osalta. Kasvun jyrkkä väheneminen vuosien 1886 ja 1887 välillä ajoittaa sen jäätikön maksimaalisen työnnön, joka liittyy kuvassa 3 näkyvän moreenin syntyyn ja tutkitun puun loukkaantumiseen.

Fig. 4. Ring-width series from the side facing the glacier in the Pacific silver fir seen in Fig. 3. The abrupt reduction in growth from 1886 to 1887 dates the maximal glacier readvance associated with the formation of the moraine and the damage suffered by the tree; see Fig. 3.

kyllä paljastaa puuttuvat lustot ja niiden sijainnin ja tuo täten esille aukottoman vuosilustosarjan tutkitun alueen puille (esim. Stokes & Smiley 1968; Ferguson 1970; Fritts 1976).

Toisinaan puun normaalina käynnistynyt kevätpuun kasvu heikkenee äkisti esimerkiksi kesäisen hallan vuoksi. Jos hallavaurio ei ole ollut kovin tuhoisa, kasvu saattaa pian elpyä. Isosoluisen kevätpuun keskelle on kuitenkin muodostunut pienisoluisen tumma raita, jota tottumaton tutkija voi luulla kesäpuuksi. Niin yksi vuosilusto voidaan tulkita kahden vuoden kasvuksi. Kuvattua häiriötä kevätpuussa sanotaan vaelustoksi tai kaksoislustoksi. Huolella hiottuja näytteitä mikroskoopilla tarkasteltaessa vaelusto on solu-koon asteittaisen vaihtumisen perusteella erotettavissa todellisesta vuosilustojen rajasta, missä pienet kesäpuun solut muuttuvat hyvin jyrkästi seuraavan vuoden suuriksi kevätpuun soluiksi (Stokes & Smiley 1968).

Joka tapauksessa ainakin ristiinajoitus paljastaa vaelustot. Samoin kuin ns. puuttuvien lustojen niin myös vaelustojen huomioonottaminen on dendrokronologisen tutkimuksen kulmakiviä.

Kuten vuosilustojen epätäydellisyys niin koko puun kasvu riippuu tietenkin monessa suhteessa biologisista tekijöistä. Esimerkiksi puun ikä on paljolta lajikohtainen. Niin ikään eri puulajeilla on erilaiset kasvuvaatimukset, minkä vuoksi ne reagoivat toisistaan poikkeavalla tavalla mm. ilmastollisiin tekijöihin. Hyvät käpyvuodet, jotka nekin riippuvat melkoisesti kasvin omista toiminnoista, ehdyttävät puun kasvuun liikeneviä voimavaroja (Mikkola 1950).

Puun kasvu on aivan alkuvuosiaan lukuunottamatta suhteellisen nopeaa ensimmäisenä vuosikymmeninä mutta alkaa sitten hidastua liki eksponentiaalisesti (esim. Mikola 1950). Puun kasvukäyrä määräytyy pääasiassa biologisesti, ja sen huomiotta jättäminen

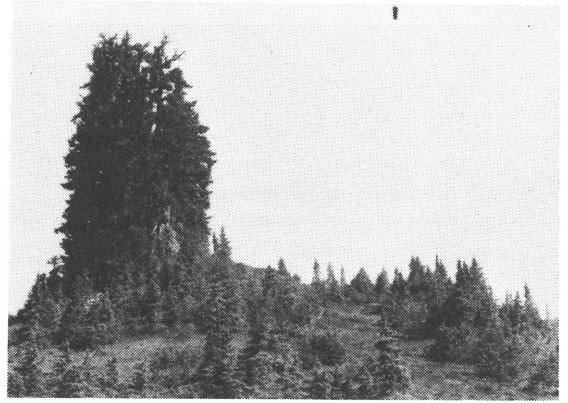
saattaa johtaa virheellisiin päätelmiin selvittäessä puun kasvun ja ilmaston välisiä suhteita. Kasvunopeus ja kasvun vaihtelu ovat kuitenkin suuressa määrin laji- ja yksilökohtaista. Niinpä dendrokronologisissa tutkimuksissa tulisi ottaa näytteitä monista puuyksilöistä ja tutkia kerrallaan vain yhtä puulajia.

Paitsi puun sisäiset luonnollisesti myös lukemattomat ulkoiset tekijät vaikuttavat puun kasvuun. Monet ulkoiset vaikuttajat ovat luonteeltaan epäjatkuvia tai ainakin ajan suhteen suuresti vaihtelevia. Näitä vaikuttajia ovat kasvitaudit, tuhoeläimet, tulipalot, tulvat, ihminen ja joskus myös kasviyksilöiden ja -lajien välinen kilpailu sekä ilmansaasteetkin. Maaperätekijät sekä sijainti auringon paisteeseen ja tuuliin nähden vaikuttavat voimakkaasti puiden toimeentuloon erityisesti niiden esiintymisalueiden ääri rajoilla. Noiden tekijöiden vaikutus on kuitenkin kullakin paikalla lähes muuttumaton vuodesta toiseen.

Ilmasto on kaikkein tärkein ja tutkituin kasvua säätelevä tekijä. Näin mm. siksi, että ilmaston vaikutus on laaja-alainen, se on alati vaihteleva ja myös aina läsnäoleva vaikuttaja. Usein nimenomaan lämpötila ja sademäärä näyttävät muodostuvan selvimmiksi puun kasvun minimitekijöiksi. Arideilla metsänraja-alueilla kasvu kuvastaa lähinnä sadannan vaihtelua, kun taas subarktisten ja subalpiinisten puiden kasvu on riippuvaista etupäässä ilman lämpötilasta (Hustich 1978).

Dendroklimatologeja eivät tavallisesti kiinnosta niinkään mikroklimaattiset seikat kuin laajoille alueille ominaiset makroklimaattiset olosuhteet, joiden ansiosta puiden vuotuinen sädekasvu vaihtelee liki pitäen yhtäläisesti suurilla alueilla. Juuri makroklimaattisten tekijöiden aiheuttama leviden ja kapeiden lustojen synkroninen vaihtelu samalla maantieteellisellä tai ainakin ilmastollisesti homogeenisellä alueella luo perustan vuosilustojen ristiinajoitukselle, paleoklimaattisille rekonstruoinneille ja melkein pätkä koko dendrokronologialle (LaMarche 1978).

Niin pelkästään pitkien lustokronologioiden luomisessa kuin myös dendroklimatologisissa analyyseissä on hedelmällistä käsitellä puita, joiden kasvua kontrolloi mahdollisimman pitkälle vain yksi ulkoinen tekijä, esimerkiksi lämpötila tai sademäärä. Mikäli tilanne on tämä, sekä kasvupaikasta että puiden lustosarjoista käytetään määrettä sensitiivinen (Ferguson 1970; Fritts 1976). Tällöin



Kuva 5. Metsänrajavyyhykettä Mount Bakerillä (Washington, U.S.A.). Ikivanhojen vuorihemlockien (*Tsuga mertensiana*) ryhmää ympäröinyt subalpiininen niitty on alkanut metsittyä. Niityn vallanneiden taimien ikä on lustolaskujen mukaan 30–90 vuotta, tavallisimmin 40–60 vuotta. Metsän leviäminen liittyy viime vuosisadan lopussa alkaneeseen ja 1920–40-luvuilla huipentuneeseen ilmaston lämpenemiseen. Kirjoittajan kuva, 7. 8. 1981.

*Fig. 5. The timberline area on Mount Baker (Washington, U.S.A.). A clump of old mountain hemlocks (*Tsuga mertensiana*) is surrounded by terrain which was a subalpine meadow until recent invasion by seedlings. Tree-ring counts show that the seedlings became established 30 to 90 (mainly 40 to 60) years ago. This forest expansion resulted from a warming in the climate which began at the very end of the 19th century and reached its peak about 1920–1950. Photographed by the author, August 7, 1981.*

lustojen leveys vaihtelee suuresti vuodesta toiseen, mikä on eduksi ristiinajoituksessa, kasvua säätelevien ilmastotekijöiden vuotuisen muuntelun jäljittämiseksi sekä puun kasvu – ilmasto-suhteiden selvittelyssä. Käsitteen sensitiivinen vastakohta on englannin kielessä »complacent», mikä kuvaa tilannetta, missä millään ulkoisella tekijällä ei ole merkittävää minimitekijän roolia. Tämä ilmenee lustonleveyden hyvin vähäisenä vaihteluna.

Edellä kerrotun jälkeen on ymmärrettävää, että dendrokronologinen tutkimus ei halaja pilviä hipovia suorarunkoisia puita kuten punamäntyjä eikä paksuja jättiläisiä niin kuin mammuttipetäjiä. Ei, dendrokronologille on puiden suuruutta vaatimattoman elämän tuoma värikkyys ja pitkäikäisyys. Siksi hän kaipaa harmaantuneita ja tuulen pieksämiä vanhuksia – niin kuin vihnemäntyä Lännen kuivilla vuoren jyrkänteillä. Totta on sekin, että arvokkaita lustokronologioita on raken-

nettu myös rehevien laaksojen lehtipuista niin kuin jokisedimentteihin hautautuneista tammista Saksassa (Becker 1979). Kuitenkin niin suojaisat painanteet kuin järvien ja jokien yltäkyläiset rannat pyrkivät tuottamaan lustosarjoja, jotka eivät ole ainakaan kovin sensitiivisiä.

Usein puun reagointi ilmastollisiin oloihin ei rajoitu vain asianomaiseen kasvukauteen vaan jatkuu seuraavinakin vuosina. Niinpä ilmaston suotuisuus parina peräkkäisenä vuonna saattaa antaa puulle voimaa, joka takaa normaalia leveämmän luston vielä epäsuotuisiksi käyneinä vuosina. Samoin tarvitaan joskus useita hyviä vuosia ennen kuin ankan ilmaston romahduttama kasvu tointuu edes tavanomaiseksi (Fritts 1976; Hustich 1978). Näin ilmenevä kasvuviive aiheuttaa monenlaisia pulmia etenkin puun kasvun ja ilmaston välisiä suhteita tutkittaessa.

Koska puun kasvuun vaikuttavat hyvin monet tekijät, jotka ovat lisäksi monella tavalla keskenään korreloituneita, on dendrokronologian tutkimusten suorittaminen taitoa vaativaa työtä. Luotettavaan tuloksiin pääseminen edellyttää perehtyneisyyttä puun fysiologisiin toimintoihin, kentätietoutta sekä tilastomatemaattisen käsittelyn ymmärtämistä.

Dendroklimatologiset tutkimukset

Tässä luvussa tarkastellaan sitä, miten luston leveyden ja ilmaston välisiä suhteita sekä paleoklimaattisia vaihteluja voidaan tutkia. Vaikka painopiste on dendroklimatologiassa, monet asiat kuten näytteiden otto ja käsittely koskevat lähes samalla tavalla muunkin kaltaisia puulustotutkimuksia.

Näytteiden otto

Dendroklimatologiset tutkimukset on kohdistettu materiaalin saannin ja ajoittamisen helppouden vuoksi pääasiassa eläviin puihin. Joskus puista sahataan kiekkoja vuotuisen sädekasvun selvittämiseksi (kuva 2). Kiekoista nähdään sädekasvun vaihtelu eripuolilla runkoa. Koska kiekkojen hankkiminen elävästä puusta vaatii puun kaatamista, kyseisen näytteenottotavan käyttö on luonnollisesti hyvin rajoitettua.

Yleensä puista otetaan näytteitä kasvukairalla (esim. Heikkinen & Tikkanen 1981). Kairaus suoritetaan tavallisesti rinnan korkeu-

delta, jolloin vältytään puun tyvipaksunnoksesta, missä lustot ovat epäsymmetrisiä ja missä lustojen leveysvaihtelu ei ehkä riipu kovin selvästi ilmastollisista tekijöistä. Niin ikään oksien ympäristöjä sekä jyrkillä rinteillä kasvavien puiden ylä- ja alarinteen puoleisia rungon sivustoja tulisi välttää, koska kasvu puun näissä osissa on mahdollisesti häiriintynyttä. Kairan tulisi osua puun ytimeen. Tämä ei ole aina helppoa, koska ydin ei sijaitse kaikissa tapauksissa keskellä runkoa. Esimerkiksi kovan tuulen ja ylärinteen puoleiset luston osat pyrkivät olemaan keskimääräistä ohuempia.

Puunäytteitä otettaessa on tehtävä tarkat kenttämuistiinpanot kasvupaikoista: korkeussuhteet, ekspositio, maaperä, maankäyttö, metsätyyppi, jne. Näytteet on numeroitava ja päivättävä. Merkinnät on tehtävä myös puulajista sekä puun koosta, terveydentilasta, jne. (Ferguson 1970; Fritts 1976: 247–248). Kentällä kairatut näytteet talletetaan tarkoitusta varten valmistettuihin koteloihin tai vaikkapa pahvisiin mehupilleihin; muovisissa pilleissä näytteet alkavat ennen pitkää homehtua.

Ilmasto säätelee puun kasvua erityisesti metsänrajan vyöhykkeessä. Niinpä metsätundra ekotonissa tai kuivan autiomaan raja-alueella kasvavat puut sisältävät selvimmän signaalin ilmastosta (LaMarche 1982). Näissä oloissa sädekasvu on niin voimakkaasti tietyn ilmastotekijän säätelemä, että jo 10 puun näytteet saattavat riittää kasvu-makroilmasto-analyysin suorittamiseen (Fritts 1976: 248, 323; LaMarche 1978). Siellä missä monien ilmastotekijöiden ja myös muiden kuin ilmastotekijöiden vaikutus lisääntyy, puiden kasvuvaihtelut käyvät melko yksilöllisiksi. Tällöin puiden ja ilmaston välisten suhteiden uskottava paljastaminen vaatii huomattavasti lukuisampien näytepuiden tutkimista.

Mikäli kustakin puusta otetaan yhden näytelastun sijasta vähintään kaksi lastua, voidaan näytepuiden lukumäärää hiukan vähentää. Nykyään pyritään joka näytepuusta kairaamaan ainakin kaksi lastua mm. puiden sisäisen varianssin laskemiseksi (kuva 10).

Näytepuissa ei saisi olla kasvuvaurioita eikä niiden tulisi kasvaa aivan vieretysten, jottei kilpailu hälvettäisi ilmastollista kasvuvaihtelusta. Näytteitä otettaessa on muistettava, että etenkin eri lajit jos kohta yksilötkin reagoivat ilmastoon jossain määrin eri tavalla ja että tietyt ilmaston ja kasvun keskinäiset

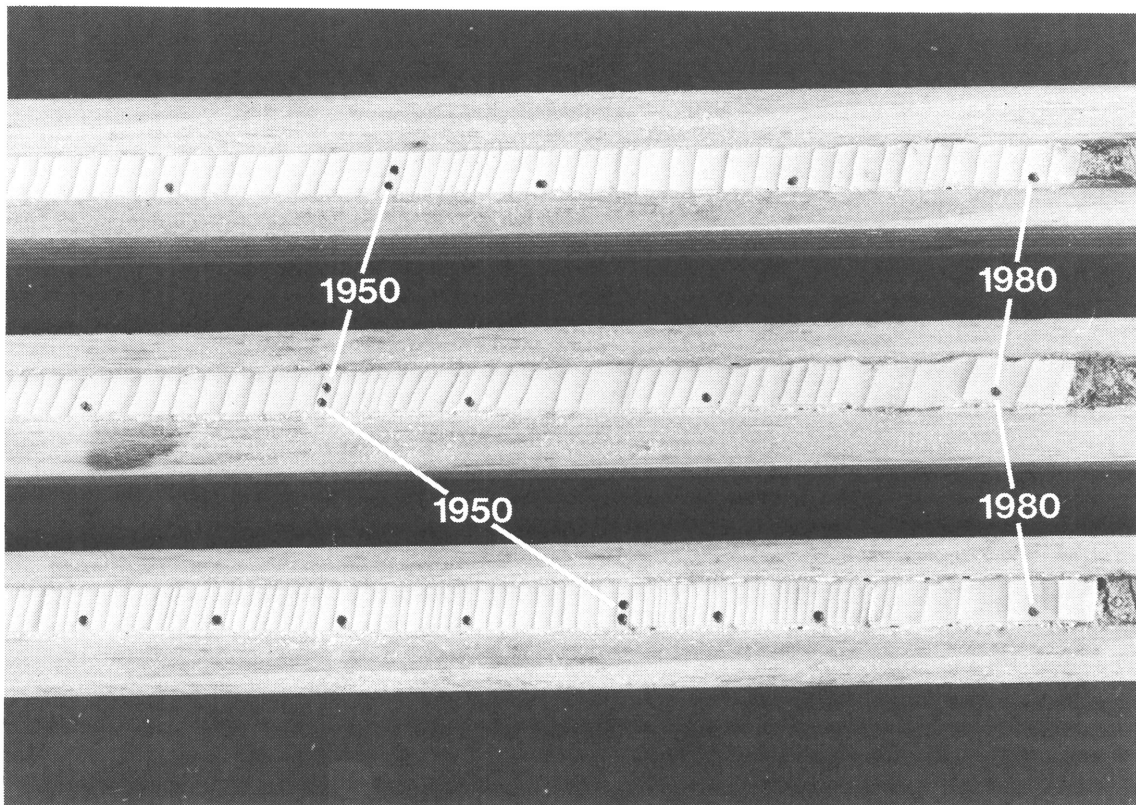
suhteet luonnehtivat todennäköisesti vain tiettyä ilmastollisesti homogeenista aluetta. Pelkästään metsänrajavyöhykkeessä viimeiset yksittäiset puut reagoivat ilmastollisiin oloihin toisin kuin läheiset, suojaisassa metsässä kasvavat puut (Fritts ym. 1971).

Näytteiden laboratorioskäsitely

Kairattujen lastujen laboratorioskäsitelystä on sekä seikkaperäisiä (Stokes & Smiley 1968) että lyhyitä ja nasevia (Ferguson 1970; Fritts 1976: 249–252) kuvauksia. Aluksi kuivahtaneet näytelastut liimataan käsittelyn helpottamiseksi vartavasten tehtyihin puutikkuihin, joissa on lastulle tehty ura (kuva 6). Lustojen erottamisen, laskemisen ja mittauksen kannalta on parasta, jos lastu kiinnite-

tään puutikkiin niin, että putkisolujen päät ovat katsojaa kohti. Puutikkuihin kirjoitetaan, usein tietokoneeseen kelpaavin koodein, näytettä koskeva oleellisin tieto, josta käy ilmi näytteenottoaika ja -aika sekä mistä puusta ja puulajista lastu on peräisin.

Kiinnitystikkuihin liimatut näytteet hiotaan hiekkapaperilla, ensin koneellisesti sitten käsin. Jotta yksittäisetkin solut erottuisivat, viimeinen käsittely suoritetaan hyvin hienolla hiekkapaperilla. Joskus hiekkapaperi korvataan partakoneen terällä tai partaveitsellä. Mikäli näytelastun pinta käsitellään teräaseella, lastu tulisi solujen erotuskyvyn parantamiseksi liimata uurrettuun tikkuun niin, että putkisolut suuntautuvat vinosti poikkileikkauspintaa ja katsojaa kohti (Stokes & Smiley 1968).



Kuva 6. Kairatut näytteet liimataan uurrettuihin puutikkuihin ja hiotaan niin, että vuosilustojen rajat erottuvat selvästi ja että ristiinajoitus voidaan suorittaa. Kuvan näytteet ovat kolmesta lännenjalokuisesta (*Abies lasiocarpa*) High Dividen alpiiniselta metsänrajalta (Olympic Mountains, Washington, U.S.A.). Näytteet on kairattu elokuussa 1981.

Fig. 6. Increment cores can be glued into grooved wooden sticks and sanded until the ring boundaries are clear enough for cross-dating. The cores in the picture were extracted from three subalpine firs (*Abies lasiocarpa*) growing at the upper timberline on High Divide (Olympic Mountains, Washington, U.S.A.). Coring took place in August 1981.

Näytteiden esikäsittelyn jälkeen suoritetaan ratkaisevan tärkeä ristiinajoitus. Tällöin samasta puusta ja eri puista kairattuja lastuja vertaillaan järjestelmällisesti toisiinsa mikroskooppia avuksi käyttäen. Tarkoituksena on ajoittaa kukin näytelastun jokaisen luston muodostumisvuosi absoluuttisen tarkasti kalenterivuosina (kuva 6). Poikkeuksellisen kapeat lustot osoittavat, minä vuosina kasvua voimakkaimmin säätelevä ilmastotekijä on ollut puiden kannalta erityisen epäsuotuisa. Harvinaisen leveät lustot viittaavat vuosiin, jolloin ilmasto ei juuri ole puiden kasvua rajoittanut. Usein nimenomaan poikkeuksellisen kapeat vuosilustot auttavat ristiinajoittamisen suorittamista. Ristiinajoituksen merkitys on siinä, että se paljastaa ja paikallistaa näytelastuista mahdollisesti puuttuvat lustot sekä vale- eli kaksoislustot.

Ristiinajoituksen jälkeen lastut pisteytetään lyijykynän kärjellä (kuva 6). Kymmenlukuja edustavat lustot varustetaan yhdellä pisteellä. Kaksi pistettä kuvaa 50-lukua, kun taas kolme rinnakkaista pistettä merkitsee 100-lukua. Omat pistemerkinnsä ovat myös ns. mikrolustoilla ja puuttuvilla lustoilla (Stokes & Smiley 1968). Pistemerkinnsä auttavat suuresti mikroskoopin avulla tapahtuvaa lustojen leveyden mittausta.

Ristiinajoitettujen lustojen leveydet mitataan mikroskoopin ja siihen kytketyn erikoislaitteen avulla 0,01 mm:n tarkkuudella. Nykyaikaisessa puulustolaboratoriossa mittaus tulokset siirtyvät nappia painamalla tietokoneeseen, josta ne voidaan koska hyvänsä tulostaa näyttöruutuun tai paperille. Tietokoneeseen kytkettyä mittaustilaitteistoa käytettäessä tutkija voi testata myös työnsä luotavuuden mittaamalla esimerkiksi 20 luston leveyden kahteen kertaan. Kriteerinään mitauserojen neliöiden summa tietokone sitten antaa arvosanan tutkijan mittaustarkkuudesta (Fritts 1976: 250–252). Hylättävä arvosana pakottaa tutkijan harjoittelemaan ennen varsinaisen mittaustyön käynnistymistä. Esimerkiksi ne lustomittaukset, joihin kuvat 7–11 perustuvat, olen tehnyt edellä kuvattuun tapaan University of Washingtonin (Seattle) puulustolaboratoriossa.

Standardointi sekä kronologioiden luominen ja analysointi

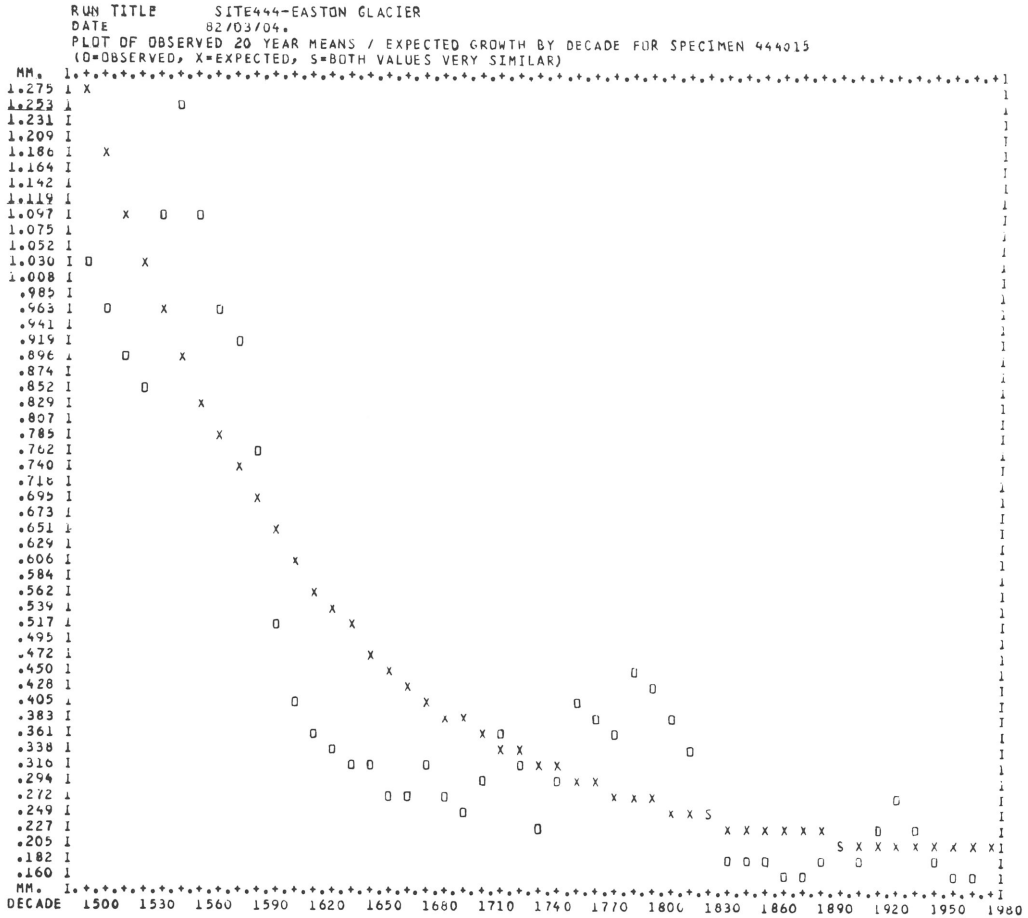
Kukin näytelastu ajoitettuine ja mitattuine vuosilustoineen muodostaa yhden lustonleveyssarjan eli aikasarjan. Samaltakin paikalta

hankitut näytelastut osoittavat, että vuotuiset lustonleveysvaihtelut ovat kaikissa puissa jossain määrin erilaisia. Erilaisuus voi johtua siitä, että kukin puu reagoi yksilöllisesti ilmaston vaihteluihin tai siitä, että kunkin puun klimaattiset tai muut kasvuolosuhteet ovat olleet hieman erilaiset. Eräs ei-klimaattinen kasvunopeutta säätelevä tekijä on jo edellä käsitelty puun ikä. Lustonleveyssarjasta voidaan poistaa ainakin osa puun iästä ja muistakin ei-klimaattisista tekijöistä (palo-vauriot, hyönteistuhot, jne.) johtuvista vaihteluista tekniikalla, jota nimitetään lustonleveyssarjan standardoimiseksi. Tällöin mitatut lustojen leveydet muutetaan vuotuisiksi indeksiarvoiksi lustosarjaan satutetun käyrän tai suoran avulla kuten pian selviää.

Menneitten vuosikymmenien yksinkertaisetkin standardoinnit (ks. esim. Mikola 1950) vaativat tietokoneiden puuttuessa paljon aikaa. Nykyään monimutkaistenkaan standardointien laskennallinen puoli ei juuri tutkijaa viivästytä. Seuraavassa esitellään lyhyesti eräitä tietokonetulostuksia, jotka olen saanut käsittelemällä Washingtonin osavaltiota koossa puulustoaineistoa Arizonan puulustolaboratorion tutkijoiden kehittämällä ohjelmilla.

Kuvassa 7 tietokone on kuvannut erään puunäytteen lustonleveydet kaudelle 1500–1981 niin, että O-kirjaimet osoittavat 20 vuoden keskiarvoja 10 vuoden välein. Näiden arvojen perusteella voidaan sitten ratkaista, millaisen matemaattisen funktion avulla lustonleveyksien standardointi aiotaan suorittaa eli miten ei-klimaattisten tekijöiden kasvuvaihtelu aiotaan eliminoida. Arizonassa kehittyessä INDEX-ohjelmassa on valittavissa neljä vaihtoehtoa. Kuvan 7 tapauksessa on käytetty väljäsisältöistä vaihtoehtoa: »Sovita negatiivinen eksponenttikäyrä. Mikäli tämä ei ole mahdollista, sovi suora». Tietokone on sitten piirtänyt pienimmän neliösumman periaatteella lustosarjalle laskevan eksponenttikäyrän X-kirjaimin.

Eksponentiaalisen standardointikäyrän käyttö on teoreettisesti varsin perusteltua, koska se muistuttaa puun kasvukäyrää; varsinkin jos dendroklimatologiankin kannalta melko arvottomat varhaisimmat lustot jätetään pois. Lisäksi eksponenttifunktio pystyy pitkälle jäljittelemään paraabelin, hyperbelin, logaritmifunktion ja yksinkertaisten polynomiyhtälöidenkin kuvaajia, joita kaikkia on käytetty lustonleveyssarjojen standardoimiseen. Harkitsematon standardointi saattaa



Kuva 7. Käyrän satuttaminen lustonleveyssarjaan INDEX-ohjelman vaihtoehdolla 3. Lastunäyte on vuorihemlokista Mount Bakerin alpiiniselta metsänrajalta (Washington, U.S.A.).

Fig. 7. Standardization by the curve-fitting option 3 of the INDEX programme. The increment core was removed from a mountain hemlock at the upper timberline on Mount Baker (Washington, U.S.A.).

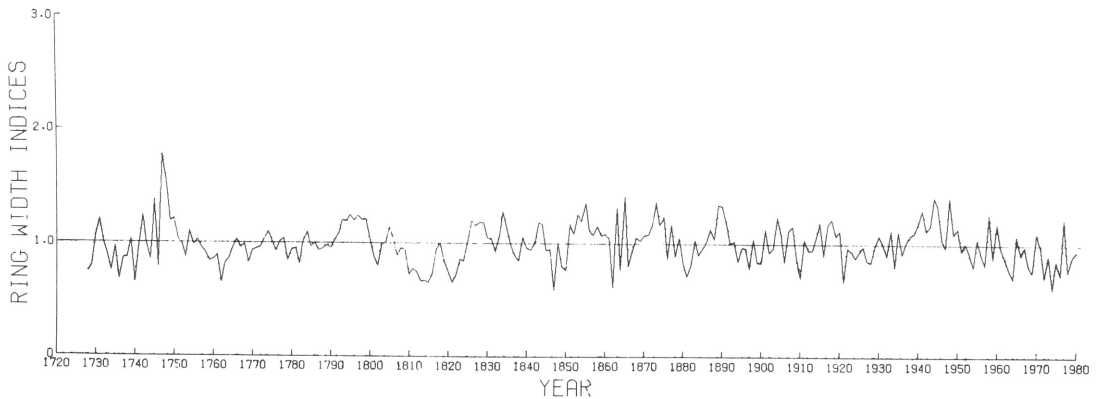
hävittää lustosarjoista myös ilmastoperäistä vaihtelua. Varsinkin pitkäaikaiset ilmaston muutokset hukkuvat helposti kasvukäyrään ja uhkaavat eliminoidua. Standardointitavoista ja niihin liittyvistä vaaroista kertovat Fritts ym. (1969), Fritts (1976) ja Graybill (1982).

Kun valittu standardointikäyrä on laadittu, luston leveydet voidaan muuttaa indeksi-arvoiksi niin, että kunkin vuoden mitattu (absoluuttinen) luston leveys jaetaan saman vuoden »odotetulla» arvolla eli käyräarvolla. Siten kunkin näytelastun indeksien keskiarvoksi tulee noin 1,0. Niin ollen kaikilla puilla on niiden kasvunopeudesta riippumatta lähes yhtäläinen paino keskiarvo- eli paikkakronologiassa (engl. mean or site chronology). Tästä on suurta hyötyä, sillä hidaskasvuiset

puut, jotka ovat usein ilmaston parhaita indikoijia, pääsevät vaikuttamaan keskiarvokronologiaan yhtä voimakkaasti kuin nopeakasvuiset puut.

Kuva 8 esittää yhtä paikkakronologiaa keskiarvoindekseinen. Kuvan taulukko, joka on tuotettu ohjelmalla SUMAC, perustuu 13 puusta kairattuun 26 näytelastuun. Vanhin ja vain yhdessä näytteessä esiintyvä lusto on tässä tapauksessa vuodelta 1728. Vuoden 1828 lusto on jo kaikissa 26 näytteessä. Kuten kuvasta 8 näkyy, ohjelma antaa joukon dendrokronologille tärkeitä tilastollisia lukuja erikseen koko kronologialle ja erikseen ns. Anova-kaudelle (tässä 1828–1981), joka on yhteinen kaikille näytelastuille.

Sama keskiarvokronologia, joka esitetään



Kuva 9. Tietokoneen piirtämä keskiarvokronologia aikavälille 1728–1981. Diagrammi perustuu samaan aineistoon kuin kuva 8.

Fig. 9. Graph of a mean chronology for the period 1728–1981 plotted by computer. The tree-ring data are the same as in Fig. 8.

soveltuu heikosti makroilmastossa tapahtuneiden muutosten samoin kuin puun kasvun ja alueellisten ilmasto-olojen vertailuun.

Kolme viimeistä varianssin aiheuttajaa (kuva 10) eivät ole yhteydessä makroilmastoon. Toinen vaihtelun lähde, »chronologies of trees in groups ($Y \times T/G$)», aiheutuu yksittäisten puiden lustonleveysvaihteluiden eroista, ja niiden osuus kokonaisvariانسista on esimerkkitapauksessamme 13,556 %. Tämä arvo on ymmärrettävästi korkea, mikäli kunkin näytepuun ympäristötekijät poikkeavat toisistaan. Paikalliset poikkeavuudet voivat olla maaperän aineksessa tai kosteudessa, rinteiden kaltevuudessa tai ekspositiossa, jne.

Kolmas vaihtelun lähde, »chronologies of core classes ($Y \times C$)», on yleensä vähämerkityksinen (esimerkkitaapauksessa sen variانسisuus on 0,700 %), koska se muodostuu samasta puusta otettujen lastujen välisistä vaihtelueroista. Neljännellä eli viimeisellä vaihtelun lähteellä, »chronologies of cores with trees in groups ($Y \times C \times T/G$)», on kuvan 10 tapauksessa varsin korkea osuus (58,955 %) kokonaisvariانسista. Tämä vaihteluosuus koostuu kaikkien yksittäisten näytelastujen välisistä lustoindexien vaihtelueroista (Fritts 1976: 290; Graybill 1982).

Variانسianalyysi on yksi tie keskiarvokronologian olemuksen erittelemiseen ja entistä parempien näyttöjenhankintastrategioiden kehittämiseen. Toiveena ja tavoitteena on tällöin tietysti saada kronologian ilmastollinen signaali eli kuvan 10 »Y» mahdollisimman korkeaksi tarkoituksenmukaisella mutta kohtuullisella näyttöjen otolla.

SUMAC-ohjelmiin voidaan sisällyttää variانسianalyysin lisäksi muitakin sekä yksittäisten näyttöjen että keskiarvokronologioiden analyysejä. Näistä mainittakoon lustoaineiston korrelaatio- ja autokorrelaatioanalyytit, jotka on mahdollista tehdä halutuille aikaväleille ainakin Anova-periodin puitteissa. Tässä artikkelissa ei ole tilaa eikä ehkä tarvetta kuvata tarkemmin näitä analyysejä. Toteutakoon vain, että niillä pyritään kootun aineiston ominaisuuksien (sensitiivisyys, homogeenisuus, autokorrelaatio, jne.) tarkkaan kartoittamiseen ennen varsinaisia dendroklimatologisia tutkimuksia. Nämä analyysit ovat myös yksi keino ja viimeinen mahdollisuus huonojen so. lustonleveysvaihteluiltaan poikkeuksellisten näyttöjen hylkäämiseen myöhemmistä, suoraan ilmastoon liittyvistä analyyseistä. Tarkempaa teknistä tietoa edellä mainituista tietokoneohjelmista ja -ajoista saa lyhyesti ja varsin helposti ymmärrettävässä muodossa mm. Graybillin (1982) artikkelista.

Puun kasvun ja ilmaston välisten suhteiden tutkiminen ja ilmastolojen rekonstruointi

Edellisessä kappaleessa kiinnitettiin huomiota siihen, kuinka paljon ilmastollista tietoa puulustokronologia sisältää ja miten tuota määrää kyettäisiin lisäämään. Nyt tulisi keksiä keino lustojen ilmastollisen viestin löytämiseksi ja tulkitsemiseksi.

Hyvin usein luston leveyden ja ilmaston välistä vaihtelua on tutkittu korrelaatio- tai

RUN TITLE		SITE222/HIGH DIVIDE					
DATE		82/03/03.		A N A L Y S I S O F V A R I A N C E			
SOURCE OF VARIATION		RAW SUM OF SQUARES	CORRECTED SUM OF SQUARES	DEGREES OF FREEDOM	MEAN SQUARE	VARIANCE COMPONENT	PERCENTAGE VARIANCE COMPONENT
GROUP MEANS	(G)	ONLY ONE GROUP IS BEING USED					
CORE CLASS MEANS	(C)	1954.335	.081	1.000	.081		
TREE MEANS IN GROUPS (T X G)		1955.434	1.179	9.000	.131		
CORE MEANS IN GROUPS (C X G)		ONLY ONE GROUP IS BEING USED					
CORE MEANS WITH TREES IN GROUPS	(C X T/G)	1956.159	.645	9.000	.072		
SUBSAMPLE	(C X T/G)	SUBSAMPLING NOT USED					
MEAN INDICES IN TOTAL CHRONOLOGY	(Y)	2023.085	68.831	94.000	.732	.032	28.189
CHRONOLOGIES OF GROUPS	(Y X G)	ONLY ONE GROUP IS BEING USED					
CHRONOLOGIES OF TREES IN GROUPS	(Y X T/G)	2106.307	82.043	846.000	.097	.015	13.556
CHRONOLOGIES OF CORE CLASSES	(Y X C)	2028.668	5.503	94.000	.059	-.001	-.700
CHRONOLOGIES OF CORE CLASSES WITH GROUPS	(Y X C X G)	ONLY ONE GROUP IS BEING USED					
CHRONOLOGIES OF CORES WITH TREES IN GROUPS	(Y X C X T/G)	2168.734	56.199	846.000	.066	.066	58.955
SUBSAMPLE	(Y X C X T/G)	SUBSAMPLING NOT USED					
TOTAL SUM =		1954.25	N OF ELEMENTS =		1900.		
ERROR SQ. DF Y =		.0045	ERROR OF Y =		.0667		

Kuva 10. Keskiarvokronologian varianssianalyysi SUMAC-ohjelman ANOVA-osaa soveltaen. Vuosia 1887–1981 koskeva kronologia perustuu 10 lännenjalokuseesta otettuun 20 näytelastuun. Näytteenotto-paikka sijaitsee High Dividen (Olympic Mountains, Washington, U.S.A.) alpiinisella metsänrajalla.

Fig. 10. Analysis of variance (ANOVA) for a mean chronology by the SUMAC programme. The chronology covers the period 1887–1981 and is based on 20 cores from 10 subalpine firs at the upper timberline on High Divide (Olympic Mountains, Washington, U.S.A.).

regressioanalyysillä (esim. Hustich 1945; Mikola 1950; Sirén 1961; Heikkinen 1980). Korrelaatioanalyysissä mitataan luston leveyden ja tarkasteltavien ilmastomuuttujien (kuukausilämpötila, -sademäärä, tms.) yhteisvaihtelun samanlaisuutta korrelaatioker-toimien avulla. Regressioanalyysissä tuote-taan korrelaatiokerroin lisäksi tilastolli-nen malli, jossa luston leveyttä selitetään ilmastollisilla muuttujilla. Kunkin ilmasto-muuttujan regressiokerroin ilmaisee kyseisen muuttujan keskimääräisen vaikutuksen seli-tettävään muuttujaan, joka on tässä tapauk-sessa luston leveys. Ilmastolliset muuttujat voivat olla lämpötila-, sademäärä-, ilmanpai-ne-, kosteus- tai vaikkapa säteilyarvoja. Li-säksi nuo selittävät muuttujat voivat edustaa esimerkiksi kuukausi-, vuodenaika- tai vuo-siarvoja.

Puun kasvun on havaittu voivan riippua

erittäin monista ilmastotekijöistä, lukuisien ei-ilmastollisten vaikuttajien lisäksi. Kaikki ilmastolliset tekijät eivät ole kuitenkaan tär-keitä samalla kasvupaikalla. Vain minimite-kijät ovat oleellisia. Toisekseen, samakaan ilmastotekijä ei ole kasvun kannalta tärkeä kaikkina vuoden kuukausina, ja samallakin tekijällä voi olla toisina vuodenaikoina posi-tiivinen toisina negatiivinen vaikutus puun kasvuun. Koska puun kasvu riippuu hyvin monimutkaisella tavalla ilmastosta, tuntuu ehkä ihmeelliseltä, että varsin yksinkertaisil-la *a priori*-luontoisilla regressiomalleilla on päästy varsin luotettaviksi osoittautuneisiin tuloksiin.

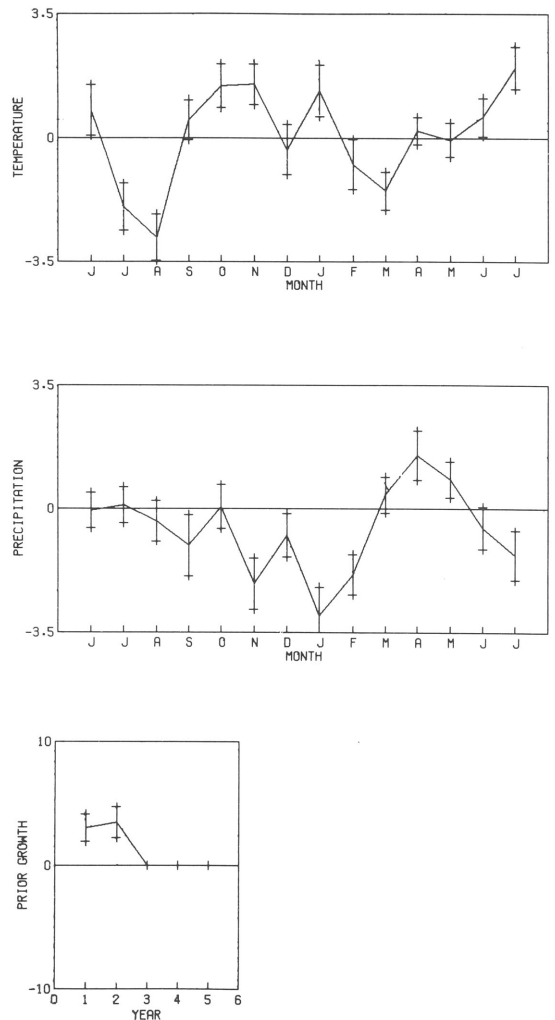
Suurin perinteisen regressioanalyysin heikkous on se, että ilmastolliset muuttujat ovat siinä keskinäisessä korrelaatioissa. Tästä syystä eivät edes monivaiheisten askeltavien regressioanalyysien tulokset ole läheskään

parhaita mahdollisia. On näet todennäköistä, että suuren tilastollisen selittävyytensä ansiosta regressiomalliin hyväksytty ilmasto-muuttuja korreloi voimakkaasti jonkun kasvulle tärkeän muuttujan kanssa. Tuo muuttuja ei kuitenkaan pääse regressioyhtälöön, koska sen selitysvoima siellä jo pääosin on, tosin vain toisen muuttujan »edustamana» (Fritts 1976: 341–352).

Tavalliseen regressioanalyysiin liittyvät haitat voidaan paljolti välttää tuottamalla ns. responseyhtälöitä (kuva 11). Tällöinkin suoritetaan regressioanalyysi, mutta siinä ei lustoindeksejä selitetä suoraan ilmastomuuttujilla vaan niistä johdetuilla uusilla muuttujilla eli eigenvektoreilla, jotka sisältävät alkuperäisten ilmastomuuttujien tiedon mutta ovat luonteeltaan ortogonaalisia eivätkä siksi korreloi keskenään vaan ovat toisistaan riippumattomia. Responseyhtälöitä ovat kuvanneet ja tulkinneet muiden muassa Fritts (1976) ja Guiot ym. (1982).

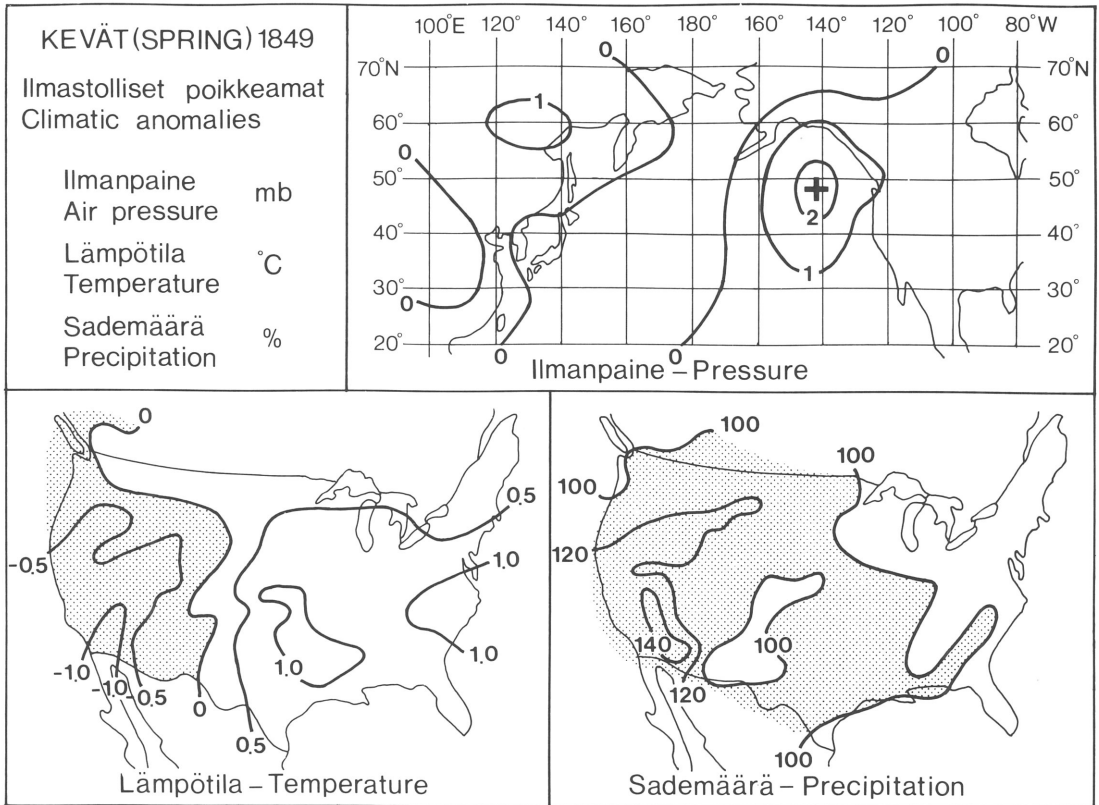
Kuvassa 11 esitetään eräs Washingtonin metsänrajan puista eigenvektori- eli pääkomponenttitekniikalla saatu responseyhtälö, joka on tietokoneen piirtämä ja perustuu 14 kuukauden (edellisen vuoden kesäkuusta kasvukauden heinäkuuhun) keskilämpötiloihin ja sadesummiin. Ilmastotiedoiksi on otettu näytepaikkaa ympäröivän homogeenisen ilmastoalueen keskiarvotiedot, koska ne korreloinevat puun lasvun kanssa paremmin kuin yksittäisen aseman arvot (Blasing ym. 1981). Edellisen vuoden ilmastotietoja on sisällytetty responseanalyysiin, koska lustonleveys ei riipu yksin luston syntyvuoden ilmasto-oloista. Selittävät ilmastomuuttujat voisivat olla muitakin kuin lämpötila- ja sademäärätietoja. Ne voisivat myös edustaa muutakin kuin ko. 14 kuukauden periodia.

Responseyhtälö voidaan tulostaa diagrammeina (kuva 11), joista näkyvät elementit eli painot eli kertoimet kullekin ilmastomuuttujalle. Nuo kertoimet ilmaisevat muuttujien suhteellisen vaikutuksen luston leveyteen. Ilmastomuuttujan ja puun kasvun välinen korrelaatio on positiivinen, jos kertoimen arvo sijoittuu 0-viivan yläpuolelle ja negatiivinen, jos kertoimen arvo sijoittuu samaisen viivan alapuolelle. Tietokone piirtää myös kertoimen 95 %:n todennäköisyysvälit. Konkretisoidaksemme kuvan 11 tulkitsemista todettakoon, että esimerkiksi kasvukauden heinäkuun keskilämpötila korreloi merkittävän positiivisesti puun kasvun kanssa. Toisin



Kuva 11. Tietokoneen piirtämä responseyhtälö lännenjalokuksen lustonleveysindekseille. Puulustoaineisto on sama kuin kuvissa 8 ja 9 kuitenkin niin, että tässä tarkastellaan vain periodia 1931–80. Responseyhtälö käsittää kertoimet 14 kuukauden keskilämpötiloille ja sadesummille. Lisäksi on kertoimet kahden kasvua edeltävän vuoden lustonleveysindekseille. Pystyviivat ilmaisevat kertoimen 95 %:n luotettavuusvälit. Koko responseyhtälö selittää 75,3 % puun kasvun vaihtelusta; ilmaston osuus on 53,4 % ja aikaisemman kasvun 21,9 %.

Fig. 11. Response function for ring-width indices from subalpine firs plotted by computer. The tree-ring data cover the period 1931–80 but are otherwise the same as in Figs. 8 and 9. The response function includes weights or coefficients for mean temperatures and total precipitations of 14 months. There are also weights for prior ring-width indices at lags of one and two years. The vertical lines indicate 95 % confidence intervals. The entire response function accounts for 75.3 % of the variance, of which 53.4 % is attributable to climate and 21.7 % to prior growth.



Kuva 12. Puulustojen avulla rekonstruoidut ilmanpaine-, lämpötila- ja sademääräanomaliat Pohjois-Amerikassa ja pohjoisella Tyynellämerellä keväällä 1849. Ilmanpaineen anomaliat on laskettu periodin 1899–1970 ja lämpötilan ja sademäärän anomaliat periodin 1901–70 keskiarvoista (Fritts ym. 1981).

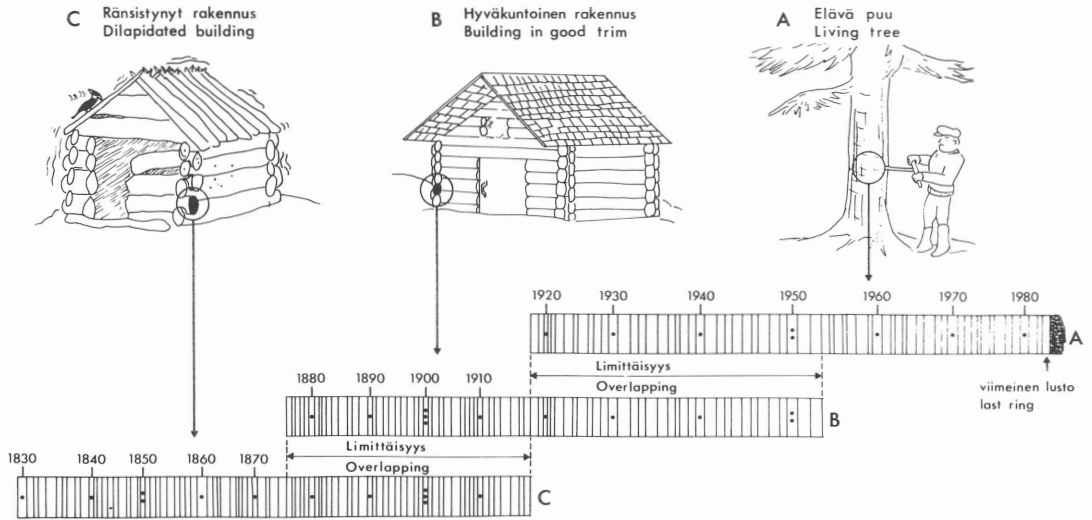
Fig. 12. Dendroclimatic reconstructions for sea level pressure, temperature and precipitation anomalies in North America and the North Pacific for the spring of 1849, expressed as departures from the mean periods 1899–1970 for pressure and 1901–70 for temperature and precipitation. Source: Fritts et al. 1981.

sanoen keskimääräistä lämpimämpi heinäkuu tuottaa keskimääräistä leveämmän luston. Sädekasvun riippuvuus samaisen heinäkuun sademäärästä on täsmälleen päinvastainen. Responseyhtälön tarkka tulkinta vaatii tietoa tutkittavan puulajin toiminnoista (hengitys, fotosynteesi, lepo, jne.) sekä kasvupaikan olosuhteista.

Kuvan 11 regressioanalyysiin on otettu mukaan paitsi ilmastomuuttujia edustavia eigenvektoreita myös kasvua edeltävien vuosien lustoindeksiä, jotta nähtäisiin, miten ja missä määrin puun kasvu riippuu edellisten vuosien kasvusta, eli kuinka voimakas on lustojen autokorrelaatio. Kuvan 11 alin käyrä osoittaa, että luston leveydellä on tilastollisesti selvä positiivinen korrelaatio kahden edellisvuoden kasvun kanssa. Esitetty

responseanalyysi on siis varsin taipuisa tutkimuskeino, vaikka sen sovellutustapoihin liittyy lukuisia ongelmia. Tästä menetelmästä tehdään jatkuvasti uusia ja entistä tehokkaampia versioita (Guiot ym. 1982).

Responseyhtälöt voivat paljastaa suhteellisen luotettavasti puulustoindexien ja mitauksiin perustuvien ilmastomuuttujien väliset suhteet eri kuukausina ja eri vuodenaikoina. Nämä suhteet tuntien lustonleveystiedosto voidaan kalibroida lämpötila- tai sadantiedostoksi tai ikään kuin muuntaa lämpötila- tai sademittariksi. Tämän jälkeen voidaan lustojen leveyksien perusteella joltisellakin varmuudella rekonstruoida ilmastovaihteluja ajalle, jolta ei vielä ole instrumentaalisia meteorologisia havaintoja. Lustonleveyksien muuntaminen esimerkiksi lämpötila- tai sa-



Kuva 13. Kuvasarja, joka esittää periaatteen siitä, miten lustonleveysarjoja voidaan yhdistää ristiinajoituksen avulla pitkiksi kronologioiksi.

Fig. 13. Principle for constructing a long chronology by cross-dating and matching separate ring-width series.

demääräarvoiksi tapahtuu juuri responseyhtälöön perustuvan ns. transferyhtälön avulla (Fritts 1976; Hughes ym. 1982).

Yhden keskiarvokronologian avulla voidaan rekonstruoida vain enemmän tai vähemmän paikallista ilmaston vaihtelua. Tutkimalla ja yhdistelemällä eri paikoilta tehtyjä kronologioita on mahdollista jäljittää hyvinkin laajojen alueiden ilmastollista menneisyyttä. Arizonan tutkijat (Fritts 1976; Fritts ym. 1981) ovat tuottaneet Pohjois-Amerikasta puulustoista johdettuja ilmastokarttoja vuoden jokaiselle vuodelle alkaen vuodesta 1600 A.D. Kartat koskevat ilmanpainetta, lämpötilaa ja sademäärää.

Näytteen Frittsin ja hänen kollegoidensa laatimista kartoista antaa kuva 12, joka ei tosin esitä itse ilmanpaineita, lämpötiloja ja sademääriä vaan niiden anomaliaita Pohjois-Amerikassa ja pohjoisella Tyynellämerellä keväällä 1849. Kartan kuvaamat paineanomaliat aiheuttavat normaalia enemmän matalapaineeseen liittyviä myrskyjä ja sateita Yhdysvaltain länsirannikolla. Sademäärän anomaliakartta osoittaa, että USA:n länsiosat olivat tuolloin keskimääräistä sateisempia ja itäosat keskimääräistä kuivempia. Ei ihme, että itä oli tuolloin myös keskimääräistä kuumempi ja länsi tavallista kylmempi. Sotilaslinnakeiden säähavainnot ja Kalifornian kultaa vuolemaan rynnänneiden »for-

ty-niners'ien» päiväkirjat tukevat kuvassa 12 esitettyjä tuloksia (Mosaic 1977; Fritts ym. 1981).

Elävien ja kuolleiden puiden ristiinajoitus ja peruskronologiat

Puulustokronologia voidaan luoda paitsi elävistä myös kuolleista puista tai molempia yhdistelemällä. Tietyille ilmastollisesti homogeeniselle alueelle laadittua, tavallisesti useita puusukupolvia käsittävää kronologiaa voidaan nimittää vaikkapa peruskronologiaksi (engl. master chronology). Peruskronologian laatiminen aloitetaan elävistä puista, jolloin kronologia on sidottu tunnettuun näytteenotovuoteen. Kronologiaa voidaan jatkaa ajassa taaksepäin, mikäli alueelta löydetään sellaisia kuolleita puuta, jotka ovat aloittaneet kasvunsa ennen eläviä puuta mutta joilla on ajallista päällekkäisyyttä elävien puiden tai toistensa kanssa (kuva 13). Tällaisia kuolleita puuta löytyy usein vanhoista rakennuksista, soista, järivistä, jne. Eri-ikäisten puiden sitominen pitkäksi kronologiaksi vaatii huolellista ristiinajoitusta (Stokes & Smiley 1968; Ferguson 1970). Jotta peruskronologia olisi todella alueellisesti edustava, sen tulisi perustua moniin puuyksilöihin.

Edellä on jo mainittu Lounais-Yhdysvalloissa rakennetut yli 8000 vuotta pitkät vih-

nenäntykronologiat ja Saksan tammista luodut vuosituhansia käsittävät lustosarjat. Kronologioita yritetään toki rakentaa monissa muissakin maissa. Ruotsalaiset ovat päässeet yhtäjaksoisessa kronologiassaan noin 1400 vuotta nykyisyydestä taaksepäin (Bartholin 1980). Suomen pisin lustosarja on Sirénin (1961) metsänrajan männyistä kokoama ja se käsittää vuodet 1181–1960. Työ pitemmänkin kronologian rakentamiseksi näyttää käynnistyneen (Eronen 1979).

Myös pitkät peruskronologiat soveltuvat ilmastollisten muutosten selvittelyyn. Niillä on myös monenlaista ^{14}C -analyysiin liittyvää käyttöä niin kuin jo aikaisemmissa yhteyksissä on käynyt ilmi. Kenties tunnetuin ja kiinnostavin käyttötapa liittyy vanhojen puurakenteiden ja -esineiden ajoittamiseen (Stokes & Smiley 1968). Mikäli käytössä on kyllin pitkä ja luotettava peruskronologia, monet arkeologiset puuainesta sisältävät löydöt kuten asumukset, sillat, linnoitukset ja vaikkapa maalausten kehukset voidaan ajoittaa jopa kalenterivuoden jos ei vuodenajankin tarkkuudella. Ajoittaminen tapahtuu periaatteessa niin, että ajoitettavasta kohteesta laaditulle lustonleveyyssarjalle haetaan sille kuuluva paikka peruskronologiasta.

Arkeologisten ajoitusten ja tutkimusten perusteella saatetaan ehkä päätellä, milloin ja mistä muinaiseen asumukseen tarvittavat puut kaadettiin, montako vuotta rakentaminen kesti, milloin ja millä puulajilla asumusta myöhemmin korjattiin tai laajennettiin (esim. Bannister & Robinson 1975). Puulöytöjen dendrokronologisen ajoituksen avulla voidaan myös selvittää elämäntapojen muutoksia ja laajempiakin kulttuurin käännteitä. Kaiken tämän onnistuminen vaatii kuitenkin eri tieteenalojen tiivistä yhteistyötä.

SUMMARY

Methods and applications of dendrochronology

The purpose of the article is to introduce dendrochronological research in the hope of encouraging students, teachers and university scientists to acquaint themselves with the utilization of tree rings. Being aware of the high reputation of Finnish dendrochronological investigations some decades ago, it is to be hoped that gifted Finnish scholars of a new generation will prove willing and able to catch up with the vanguard of international dendrochronology once more.

Even Leonardo da Vinci pondered over the relationships between the width of tree rings and past climates, although the first dendrochronological »observer» are usually said to have been the French naturalists Comte de Buffon and Henri Duhamel, who discovered in 1737 that a given frost-damaged tree ring was traceable and datable in all newly cut trees in a particular area. The linking of ring-width series of successive tree generations by cross-dating, the essence of modern dendrochronology, was arrived at independently by several investigators. One of these was Andrew E. Douglass, known as the father of dendrochronology, who established the Laboratory of Tree-Ring Research at the University of Arizona in Tucson. Due to its continued fruitful research this laboratory is still a sort of Mecca for dendrochronologists, although invaluable work is being done also in many European countries, for example.

Dendrochronology, with all of its subfields, is basically founded upon tree-ring counts and the measurement of ring widths. Sometimes the widths of the earlywood and latewood are measured separately. The width of the earlywood, like that of the whole annual ring, reflects the macroclimatic conditions relatively accurately only in extreme areas such as semiarid regions and sites near arctic/alpine timberlines, whereas in temperate and humid regions they are considerably affected by microclimatic agents. The width of the latewood, on the other hand, responds rather sensitively to the macroclimate of the growing season even under the latter circumstances.

New methods for extracting information from tree-ring records are being developed all the time. In recent times the densitometric technique for measuring tree rings has proved particularly successful, the maximum density of the tree ring being preferred to ring-width parameters as an indicator of macroclimatic conditions during the growing season.

At the same time determination of the proportions of stable isotopes (D/H , $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) in tree rings facilitates palaeoclimatic reconstruction, despite the fact that the ratios of these isotopes in wood cellulose, for instance, do not depend in any simple way upon climatic variations. Investigations based on the content of the radioactive ^{14}C isotope in annual rings already have a firm foundation. Determination of the ^{14}C content of rings of known ages enables one to estimate the atmospheric ^{14}C content for the years concerned and in this way to gain information on the numbers of sunspots, which are known to modulate ^{14}C production and are claimed by many scientists to have an impact on climatic events. The most important use developed for tree-ring ^{14}C readings, however, is associated with the calibration of radiocarbon dates, which has now been extended back in time about 8000 years by reference to the chronology of the bristlecone pine (*Pinus longaeva*).

The anatomical structure of the xylem of beech trees and other tree species has been analyzed in Germany, for example, to show annual variations in precipitation, in particular. The determination of trace elements such as lead, mercury and cadmium in tree rings is capable of indicating to what extent and at what time the pollutants produced

in the industrialized world have increased compared with the background level of the past.

The condition of trees is often affected, and the width of their annual rings reduced, by airborne contaminants (Figs. 1 and 2). Hazards can in many cases be dated by tree-ring counts so that eccentric or otherwise abnormal rings may imply a flood, landslide, aeolian process, avalanche, frost or fire. Similarly trees may be damaged by ice floes on sea, lake or river shores, or by glaciers in mountainous areas (Figs. 4 and 5). Volcanic eruptions, plagues of insect and plant diseases are also capable of being dated by means of annual rings. The age distribution of trees on a particular site, as determined by tree-ring counts, may be used to date a climatic period favourable to forest expansion (Fig. 5).

In dendroclimatological investigations tree-ring data should always be collected so as to reveal the relationships between growth and macroclimate as accurately as possible. Besides, only a convincing presentation of these relationships can permit cogent palaeoclimatic reconstructions to be made.

The article demonstrates the sampling strategy, laboratory techniques and cross-dating methods needed in dendroclimatological studies (Figs. 6 and 13). Computer runs could proceed through the stages presented in Figs. 7–11. The computer programmes used here are those designed at the Arizona tree-ring laboratory. The standardization technique (Fig. 7) is aimed at eliminating growth trends and, if feasible, other non-climatic fluctuations from the tree-ring patterns. The averaged standardized ring-width indices for trees sampled from a given site constitute the site or mean chronology (Figs. 8 and 9).

Analysis of variance provides an efficient means of evaluating what proportion of the total variance in a mean chronology is at least mainly due to the macroclimatic component (»Mean indices in total chronology (Y)»; 28.189 % in the case of Fig. 10) and, in general, which major sources this variance stems from. It is also hoped that an analysis of variance will facilitate the development of new collection strategies so that the sample assemblages would include a stronger macroclimatic signal.

Response functions produced with the eigenvector technique (Fig. 11) are capable of defining relationships between tree growth and climate more correctly than are the equations generated by classical regression analyses. Reliable results from growth-climate analyses are of crucial importance for the reconstruction of climatic conditions prevailing in pre-instrumental times (Fig. 12).

Long master chronologies are also used for dating historical and archaeological finds containing wood. In this way tree-ring evidence can help to solve many cultural riddles, too, but usually on the condition that scholars of different discipline can work on these problems together.

Kirjallisuus

Alestalo, J. (1971). Dendrochronological interpretation of geomorphic processes. *Fennia* 105, 1–140.

- Bannister, B. & W. J. Robinson (1975). Tree-ring dating in archaeology. *World Archaeology* 7, 210–225.
- Bartholin, T. S. (1980). Träden växer med tiden. *Forskning och Framsteg* 7/80, 26–32.
- Becker, B. (1979). Dendrochronologie subfossiler Baumstämme aus Flusschottern, Hochmooren und Waldgrenzstandorten. *Allgemeine Frost Zeitschrift* 49, 1360–1364.
- Becker, B. (1980). Tree-ring dating and radiocarbon calibration in South-Central Europe. *Radiocarbon* 22, 219–226.
- Blasing, T. J., D. N. Duvick & D. C. West (1981). Dendroclimatic calibration and verification using regionally averaged and single station precipitation data. *Tree-Ring Bulletin* 41, 37–43.
- Burk, R. L. & M. Stuiver (1981). Oxygen isotope ratios in trees reflect mean annual temperature and humidity. *Science* 211, 1417–1419.
- Douglass, A. E. (1914). A method of estimating rainfall by the growth of trees. In: *The climatic factor*, ed. by E. Huntington. *Carnegie Institute of Washington Publications* 192, 101–122.
- Dunwiddie, P. W. (1979). Dendrochronological studies of indigenous New Zealand trees. *New Zealand Journal of Botany* 17, 251–266.
- Eckstein, D. & E. Frisse (1982). The influence of temperature and precipitation on vessel area and ring width of oak and beech. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 12–13.
- Eckstein, D., E. Frisse & F. Quiehl (1977). Holzanatomische Untersuchungen zum Nachweis anthropogener Einflüsse auf die Umweltbedingungen einer Rotbuche. *Angewandte Botanik* 51, 47–56.
- Epstein, S. & C. J. Yapp (1976). Climatic implications of the D/H ratio of hydrogen in C–H groups in tree cellulose. *Earth and Planetary Science Letters* 30, 252–261.
- Eronen, M. (1979). The retreat of pine forest in Finnish Lapland since the Holocene climatic optimum: a general discussion with radiocarbon evidence from subfossil pines. *Fennia* 157: 2, 93–114.
- Ferguson, C. W. (1970). Concepts and techniques of dendrochronology. In: *Scientific methods in medieval Archaeology*, ed. by R. Berger. University of California Press, Berkeley, pp. 183–200.
- Fritts, H. C. (1971). Dendroclimatology and dendroecology. *Quaternary Research* 1: 4, 419–449.
- Fritts, H. C. (1976). *Tree rings and climate*. Academic Press, London. 567 pp.
- Fritts, H. C., T. J. Blasing, B. P. Hayden & J. E. Kutzbach (1971): Multivariate techniques for specifying tree-growth and climate relationships and for reconstructing anomalies in paleoclimate. *Journal of Applied Meteorology* 10: 5, 845–864.
- Fritts, H. C., G. R. Lofgren & G. A. Gordon (1981). Reconstructing seasonal to century time scale variations in climate from tree-ring evidence. In: *Climate and history: studies in past climate and their impact on Man*, ed. by T. M. L. Wigley, M. J. Ingrams & G. Farmer. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 139–161.

- Fritts, H. C., J. E. Mosimann & C. P. Bortorff (1969). A revised computer program for standardizing tree-ring series. *Tree-Ring Bulletin* 29, 15–20.
- Gray, J. (1981). The use of stable-isotope data in climate reconstruction. In: *Climate and history: studies in past climate and their impact on Man*, ed. by T. M. L. Wigley, M. J. Ingrams & G. Farmer. Cambridge University Press, Cambridge.
- Graybill, D. A. (1982). Chronology development and analysis. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 21–28.
- Guiot, J., A. L. Berger & A. V. Munaut (1982). Response functions. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 38–45.
- Havas, P. & S. Huttunen (1972). The effect of air pollution on the radial growth of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.). *Biological Conservation* 4, 361–368.
- Heikkinen, O. (1980). Mountain pine radial growth and the forest limit zone in Gadmental, the Swiss Alps. *Fennia* 158: 1, 1–14.
- Heikkinen, O. (1982). Auringonpilkut ja niiden yhteys maapallolla havaittuihin luonnonilmiöihin. – Sunspots and their relation to terrestrial phenomena. *Terra* 94, 207–214.
- Heikkinen, O. (1984). Dendrochronological evidence of variations of the Coleman Glacier, Mount Baker, Washington, U.S.A. *Arctic and Alpine Research* 16, (painossa).
- Heikkinen, O. & M. Tikkanen (1981). Ilmansaasteiden vaikutus havupuiden kasvuun, esimerkkinä Sköldvikin öljynjalostamon ympäristö. – The effect of air pollution on growth in conifers: an example from the surroundings of the Sköldvik oil refinery. *Terra* 93, 133–144.
- Hitch, C. J. (1982). Dendrochronology and serendipity. *American Scientist* 70, 300–305.
- Huber, F. (1976). Problèmes d'interdatation chez le pin sylvestre et influence du climat sur la structure de ses accroissements annuels. *Annales des Sciences Forestières* 33: 2, 61–86.
- Hughes, M. K., P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. (toim.) (1982). *Climate from tree rings*. Cambridge University Press, Cambridge. 223 pp.
- Hustich, I. (1945). The radial growth of the pine at the forest limit and its dependence on the climate. *Commentationes Biologicae, Societas Scientiarum Fennica* 9: 11, 1–30.
- Hustich, I. (1956). Notes on the growth of Scotch pine in Utsjoki in northernmost Finland. *Acta Botanica Fennica* 56, 1–13.
- Hustich, I. (1958). On the recent expansion of the Scotch pine in northern Europe. *Fennia* 82: 1, 1–25.
- Hustich, I. (1978). The growth of Scots pine in northern Lapland, 1928–77. *Annales Botanici Fennici* 2, 274–300.
- Kallio, P. & J. Lehtonen (1973). Birch forest damage caused by *Oporinia autumnata* (Bkh.) in 1965–66 in Utsjoki, N Finland. *Reports from the Kevo Subarctic Research Station* 10, 55–69.
- Kienast, F. (1982). Jahrringanalytische Untersuchungen in immissionsgefährdeten Waldschadensgebieten des Walliser Rhonetales. *Geographica Helvetica* 37, 143–148.
- LaMarche Jr, V. C. (1978). Tree-ring evidence of past climatic variability. *Nature* 276: 5686, 334–338.
- LaMarche Jr, V. C. (1982). Sampling strategies. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 2–6.
- LaMarche Jr, V. C. (toim.) (1983). *Soviet publications in dendrochronology I. Translations of recent articles and books*. Published by The Tree-Ring Society. Tucson, Arizona. 335 pp.
- LaMarche Jr, V. C. & K. K. Hirschboek (1984). Frost rings in trees as records of major volcanic eruptions. *Nature* 307, 121–126.
- Lawrence, D. B. (1950). Estimating dates of recent glacier advances and recession rates by studying tree growth layers. *American Geophysical Union Transactions* 31, 243–248.
- Long, A. (1982). Stable isotopes in tree rings. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 13–18.
- Matthews, J. A. (1977). Glacier and climatic fluctuations inferred from tree-growth variations over the last 250 years, central southern Norway. *Boreas* 6, 1–24.
- Mazany, T., J. C. Lerman & A. Long (1980). Carbon-13 in tree-ring cellulose as an indicator of past climates. *Nature* 287, 432–435.
- Mikola, P. (1950). Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvututkimuksissa. – On variations in tree growth and their significance to growth studies. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 38: 5, 1–131.
- Mosaic (1977). Tales the tree rings tell. *National Science Foundation* 8: 5, 1–9.
- Parker, M. L. & W. E. S. Henoch (1971). The use of Engelmann spruce latewood density for dendrochronological purposes. *Canadian Journal of Forest Research* 1: 2, 90–98.
- Polge, H. (1966). Etablissement des courbes de variation de la densité du bois par exploration densitométrique de radiographies d'échantillons prélevés à la tarière sur des arbres vivants. *Annales des Sciences Forestières* 23: 1, 1–206.
- Robinson, W. J. (1976). Tree-ring dating and archaeology in the American Southwest. *Tree-Ring Bulletin* 36, 9–20.
- Röthlisberger, F. (1976). Gletscher- und Klimaschwankungen im Raum Zermatt, Ferpècle und Arolla. *Die Alpen* 52: 3/4, 59–152.
- Schiegl, W. E. (1974). Climatic significance of deuterium abundance in growth rings of *Picea*. *Nature* 251, 582–584.
- Schweingruber, F. H. (1982). Measurement of densitometric properties of wood. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 8–12.
- Schweingruber, F. H. (1983). *Der Jahrring – Standort, Methodik, Zeit und Klima in der Dendrochronologie*. Haupt, Bern und Stuttgart. 234 pp.
- Schweingruber, F. H., O. U. Bräker & E. Schär (1979). Dendroclimatic studies on conifers from central Europe and Great Britain. *Boreas* 8, 427–452.

- Schweingruber, F. H., H. C. Fritts, O. U. Bräker, L. G. Drew & E. Schär (1978). The x-ray technique as applied to dendroclimatology. *Tree-Ring Bulletin* 38, 61–91.
- Sirén, G. (1961). Skogsgränstallen som indikator för klimatfluktuationerna i norra Fennoskandien under historisk tid. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 54: 2, 1–66.
- Smith, L. P. & C. W. Stockton (1981). Reconstructed stream flow for the Salt and Verde Rivers from tree-ring data. *Water Resources Bulletin, American Water Resources Association* 17: 6, 939–947.
- Stockton, C. W. & W. R. Bogges (1979). Augmentation of hydrologic records using tree-rings. *Proceedings of the Engineering Foundation Conference »Improved Hydrologic Forecasting – Why and How», ASCE*. Pacific Grove, Ca. March 25–30, 1979. pp. 239–265.
- Stockton, C. W. & H. C. Fritts (1973). Long-term reconstruction of water level changes for Lake Athabasca by analysis of tree rings. *Water Resources Bulletin, American Water Resources Association* 9: 5, 1006–1027.
- Stokes, M. A. & T. L. Smiley (1968). *An introduction to tree-ring dating*. University of Chicago Press, Chicago. 73 pp.
- Stuiver, M. (1980). Solar variability and climatic change during the current millenium. *Nature* 286, 868–871.
- Stuiver, M. & P. D. Quay (1980). Changes in atmospheric carbon-14 attributed to a variable sun. *Science* 207, 11–19.
- Suess, H. E. (1980). The radiocarbon record in tree rings of the last 8000 years. *Radiocarbon* 22, 200–209.
- Thompson, M. A. (1981). Tree rings and air pollution: a case study of *Pinus monophylla* growing in east-central Nevada. *Environmental Pollution (Series A)* 26, 251–266.
- Vesajoki, H. (1978). Erään maanvieremän anatomia. – Anatomy of a landslide. *Terra* 90, 15–19.
- Wigley, T. M. L. (1982). Oxygen-18, carbon-13, and carbon-14 in tree rings. In: *Climate from tree rings*, ed. by M. K. Hughes, P. M. Kelly, J. R. Pilcher & V. C. LaMarche Jr. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 18–21.
- Yamaguchi, D. K. (1982). New tree-ring dates for recent eruptions of Mount St. Helens. *Seventh Biennial Conference of American Quaternary Association, Program and Abstracts*, June 28–30, 1982, p. 183.
- Zackrisson, O. (1977). Influence of forest fires on the North Swedish boreal forest. *Oikos* 29, 22–32.