METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN
JULKAISUJA

COMMUNICATIONES
INSTITUTI FORESTALIS FENNIAE

MEDDELANDEN FRÅN SKOGSFORSKNINGSINSTITUTET I FINLAND
MITTEILUNGEN DER FORSTLICHEN FORSCHUNGSANSTALT IN FINNLAND
PUBLICATIONS OF THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE
PUBLICATIONS DE L'INSTITUT DE RECHERCHES FORESTIÉRES DE LA FINLANDE

78

HELSINKI 1973

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN
JULKAISUJA

COMMUNICATIONES
INSTITUTI FORESTALIS FENNIAE

MEDDELANDEN FRÅN SKOGSFORSKNINGSINSTITUTET I FINLAND
MITTEILUNGEN DER FORSTLICHEN FORSCHUNGSANSTALT IN FINNLAND
PUBLICATIONS OF THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE
PUBLICATIONS DE L'INSTITUT DE RECHERCHES FORESTIÉRES DE LA FINLANDE

78

HELSINKI 1973

COMMUNICATIONES

INSTITUTI FORESTALIS FENNIAE

78

Sarvas, Risto. 1973. Olli Heikinheimo in memoriam ..... 1— 8

Hovi, Lea. 1973. Olli Heikinheimon kirjallinen tuotanto. List of publications ..... 9—20

78.1 Hakkila, Pentti. 1973. The effect of slash on work difficulty in manual planting. *Seloste:* Hakkuutähteitten vaikutus käsinistutuksen työvaikeuteen ..... 1—36

78.2 Poso, Simo & Kujala, Matti. 1973. The effect of topography on the volume of forest growing stock. *Seloste:* Topografian vaikutus puuston kuutiomäärään ..... 1—29

78.3 Simpanen, Jaakko. 1972. Kuusen ympärysmitan kasvua lyhyin aikavälein selittäviä malleja. *Summary:* Models explaining the growth of spruce circumference over short time intervals ..... 1—50

78.4 Ahti, Erkki. 1973. Correcting stem girth measures for variations induced by soil moisture changes. *Seloste:* Maan kosteusmuutosten aiheuttaman paksuusvaihtelun eliminoiminen mitattaessa puiden päivittäistä paksuuskasvua ..... 1—18

78.5 Kurkela, Timo. 1973. Release and germination of basidiospores of *Melampsora pinitorqua* (Braun) Rostr. and *M. Larici-tremulae* Kleb. at various temperatures ..... 1—22

78.6 Salminen, Sakari. 1973. Tulosten luotettavuus ja karttatulostus valtakunnan metsien V inventoinnissa. *Summary:* Reliability of the results from the fifth national forest inventory and a presentation of an output-mapping technique ..... 1—64

78.7 Lähde, Erkki & Siltanen, Seppo. 1973. Männyn taimien kunto ja juuriston rakenne Pohjois-Suomessa. *Summary:* The structure of the root system and the condition of the pine *(Pinus silvestris L.)* seedlings in northern Finland ..... 1—31

78.8 Annila, Erkki. 1973. Chemical control of spruce cone insects in seed orchards. *Seloste:* Kuusen käpy- ja siementuholaisten kemiallisesta torjunnasta siemenviljelmillä ..... 1—25

78.9 Väliaho, Hannu & Vuokila, Yrjö. 1973. A system for simulation of the development of stemdiameter distributions. *Seloste:* Runkolukusarjan kehityksen simulointimenetelmä .... 1—28

78.10 Koski, Veikko. 1973. On self-pollination, genetic load and subsequent inbreeding in some conifers. *Seloste:* Geneettisen kuorman vaikutus itsepölytyksestä aiheutuvaan sukusiitokseen eräillä havupuilla ..... 1—40

OLLI HEIKINHEIMO

IN MEMORIAM

1882—1973



1942

Olli Heikinkeimo

Olli Heikinheimo

in memoriam

Metsäntutkimuslaitoksen ensimmäinen pitkäaikainen johtaja ja metsänhoidon professori, filosofian tohtori Olli Heikinheimo, yksi Suomen metsätieteen ja metsätalouden näkyvimpiä henkilöitä ja uranuurtajia kuoli 90 vuoden ikäisenä helmikuun 3 päivänä 1973.

Olli Heikinheimo syntyi Rovaniemellä 12. 5. 1882. Hänen isänsä oli Rovaniemen hoitoalueen aluemetsänhoitaja. Varmaan isän ammatti vaikutti ainakin osaksi Olli Heikinheimon uran valintaan. Tultuaan ylioppilaaksi Oulun lyseosta 1901 hän aloitti opinnot Evon metsäopistossa, josta valmistui metsänhoitajaksi 1904.

Heikinheimo suuntautui jo varhain opettajan ja tutkijan uralle. Toimittuaan vähän aikaa metsänarvostelijana Sodankylän hoitoalueessa hän syksyllä 1905 tuli Rovaniemen metsäkoulun tilapäiseksi opettajaksi ja jo seuraavana vuonna ensin opettajaksi ja myöhemmin johtajaksi Tuomarniemen metsäkouluun.

Tuomarniemen kausi, joka kesti kaikkiaan kuusi vuotta, oli ilmeisesti hyvin vaikutteista rikas ja onnellinen jakso Heikinheimon elämässä; pantakoon merkille, että osan tästä ajasta Heikinheimolla oli Erik Lönnroth kanssaopettajana. Toimittuaan pari vuotta Simon hoitoalueen aluemetsänhoitajana Heikinheimo sai nimityksen Evon hoitoalueen aluemetsänhoitajaksi ja Evon metsäkoulun johtajaksi. Tästä jo hyvin merkittävästä asemasta hänet kutsuttiin v. 1918 hoitamaan vasta perustetun metsätieteellisen koelaitoksen johtajan ja metsänhoidon professorin tehtäviä.

Jo opiskeluaikana Evolla Heikinheimo oli syvästi kiintynyt opettajaansa tohtori G. A. Blomqvistiin, mikä kiintymys vuosien kuluessa kehittyi näiden kahden Suomen metsätalouden ja erityisesti suomalaisen metsänhoitotieteen merkkimiehen väliseksi pysyväksi ystävyydeksi. Ilmeisesti juuri Blomqvist'in kehoituksista Heikinheimo ryhtyi harkitsemaan yliopistollisten opintojen jatkamista. Tuomarniemeltä käsin hän v. 1911 suoritti fil.kandidaatin tutkinnon, pääaineena metsänhoito. Välittömästi tämän jälkeen hän pani alulle väitöskirjatyön aiheesta Kaskiviljelyksen vaikutus Suomen metsiin. Tämä mainehikas tutkimustyö, usein erilaisten virkatehtävien keskeyttä-

mänä, valmistui v. 1915. Seuraavana vuonna Heikinheimo sai fil.tohtorin arvon. Jo tätä ennen hän oli esiintynyt ahkerana kirjoittajana; julkaisujen luettelossa on tältä ajalta kaikkiaan yhdeksän erillistä kirjallista esitystä, joista useimmat käsittelevät harvennushakkuita.

Ottaessaan vastaan metsäntutkimuslaitoksen johtajan tehtävät Heikinheimo oli 36 vuoden ikäinen, mies parhaissa voimissaan, täynnä palavaa intoa kohdata ne suuret tehtävät, jotka häntä johtajana ja professorina odottivat. Mutta hänellä oli myös runsain mitoin henkistä katetta tähän tehtävään: 14 vuoden käytännöllinen ja hallinnollinen kokemus metsätalouden vastuunalaisissa tehtävissä, tunnustusta saanut väitöskirja ja fil. tohtorin arvo.

Se cajanderilainen järjestelmä ja henki, jonka merkeissä vasta perustettu metsäntutkimuslaitos aloitti toimintansa, vieroksui kaikkea johtajavaltaisuutta. Cajander korosti usein, että tieteellisen laitoksen johtajan tulisi aina olla korkeintaan ensimmäinen vertaistensa joukossa, primus inter pares. Tämä oli periaate, jota Heikinheimo toteutti koko elämänsä ajan. Varsinkin ensi vuosina hän näkikin tehtävänään ennen kaikkea aktiivisen tutkimustyön, johon hän heti antautui ennen näkemättömällä tarmolla ja tuotteliaisuudella. Kolmen vuoden aikana ilmestyi neljä laajaa tutkimusjulkaisua, jotka käsittelivät eri puolilta silloin — ja taas tänäkin päivänä — problemaattista ja ajankohtaista Pohjois-Suomen kuusikysymystä.

Heikinheimon tieteelliselle tuotannolle on tunnusomaista käytännön läheisyys; kysymyksenasettelut lähtivät lähes aina suoraan käytännön kentältä, ja kuten moni muu metsätieteen tutkija, Heikinheimo ammensi henkisiä voimavaroja siitä tyydytyksestä, mitä tutkija kokee nähdessään palvelevansa itselleen läheistä käytännön toimintakenttää. On merkille pantavaa, että tämän hetken metsänhoidon tutkijain nuori varttuva polvi on löytänyt Heikinheimon ikään kuin uudestaan. Jo välillä pölyttymään päässeet niteet on kaivettu esiin kirjastojen hyllyiltä, ja tällä hetkellä esim. Heikinheimon taimitarhatekniikkaa ja metsänviljelymenetelmiä koskevat tutkimusjulkaisut ovat ahkerassa käytössä, samoin Pohjois-Suomen kuusikoita koskevat julkaisut erityisesti Pohjois-Suomen tutkijain käsissä.

Paitsi tutkijana, metsäntutkimuslaitos ja Suomen metsätalous muistaa Heikinheimon myös suurena rakentajana. Niiden yli 30 vuoden aikana, jotka Heikinheimo toimi metsäntutkimuslaitoksen johtajana, laitos kasvoi aivan vähäisestä alusta erääksi maamme suurimmista tutkimuskeskuksista. Laitos laajeni sekä sisään että ulospäin. Edellisellä tarkoitetaan tutkijanvirkojen ja itsenäisten osastojen suurta lisääntymistä, jälkimmäisellä ennen muuta Suomen metsäntutkimuslaitokselle erityisesti ominaisen laajan kokeilualuejärjestelmän rakentamista. Kokeilualueet olivatkin eräs Heikinheimon kuningasajatus, jonka hän toteutti vertaansa hakevalla taitavuudella ja suuripiirteisyydellä.

Heikinheimon vaikutus tuntui paljon metsäntutkimuslaitosta laajemmallekin ja monipuolisesti koko metsätaloudessamme ja sen kehityksessä. Erityisesti metsänhoidon käytännössä vaikutus oli syvällekäypä. Heikinheimo kehitti olennaisesti metsissämme käytettyjä kasvatus- ja uudistushakkuumenetelmiä, vaikutti harsinnan luonteisten hakkuutapojen väistymiseen ja pani alulle metsägeneettisen tutkimustyön ja metsäpuiden jalostuksen maassamme. Hän toimi määrätietoisesti myös tutkimusten ja kokeiden tiedottamiseksi käytännölle. Lukemattomille ammattimiesretkikunnille hän esitteli tutkimuksiaan ja niiden tuloksia kokeilualueissa ja hänen vielä eläkevuosinaan laatimat kokeilualueiden retkeilyoppaat ovat elävöittäneet vierailijoille kokeiden tuloksia.

Heikinheimo oli jäsenenä monissa tieteellisissä seuroissa, hoiti niissä vastuunalaisia tehtäviä ja joutui huomattavien kotimaisten ja kansainvälisten kunnianosoitusten kohteeksi. Ehkä erityisen maininnan ansaitsee, että hän toimi 1921—1941, nähtävästi pitempään kuin kukaan muu, Suomen Metsänhoitoyhdistyksen, nykyisen Suomen Metsäyhdistyksen puheenjohtajana. Tänä aikana Heikinheimo nähtiin suuressa määrin koko ammattikunnan lipunkantajana, ei vain metsänhoitajien, vaan myös metsäteknikoiden, joiden yhteiskunnallisen arvostuksen kehittäminen oli Heikinheimolle läheinen asia. Yhdistys kutsuikin hänet kunniajäsenekseen. On myös aivan luonnollista, että Heikinheimo teki lukuisia ulkomaan matkoja; erityisesti hänen yhteytensä muihin Pohjoismaihin olivat hyvin läheiset, monien henkilökohtaisten ystävyyden siteiden lujittamat. Norrlands Skogsvårdsförbund nimitti hänet kunniajäsenekseen v. 1947 ja Norsk Forstmannsforeningyhdistys vähän myöhemmin den Grønne gren-ritariksi.

Metsäntutkimuslaitos, Suomen metsätiede ja metsätalous muistavat suurta uranuurtajaansa syvän kunnioituksen ja kiitollisuuden tuntein.

Risto Sarvas

Olli Heikinheimo

Obituary

Olli Heikinheimo, Doctor of Philosophy, the first longstanding Director of the Finnish Forest Research Institute and Professor of Silviculture, died at the age of 90 on February 3rd 1973. He was an outstanding person and a pioneer in Finnish forest science and forestry.

Olli Heikinheimo was born in Rovaniemi on May 12th 1882, the son of the chief forester of Rovaniemi Forest District. His father's profession certainly influenced to some extent his choise of career and after matriculating from Oulu Secondary School in 1901 he began his studies at Evo Forest Institute, where he became Bachelor of Forestry in 1904.

Heikinheimo very early chose the career of teacher and researcher. Working for a while as a forest estimator in Sodankylä Forest District, he became a temporary teacher at Rovaniemi Forest Rangers School in autumn 1905. The following year he became first a teacher and later the Head of Tuomarniemi Forest Rangers School.

The period at Tuomarniemi, which lasted six years, was apparently rich in experiences and was a happy period in Heikinheimo's life; it is worth noting that for some of this time he had Erik Lönnroth as a colleague. After working for two years as chief forester in Simo Forest District, Heikinheimo was nominated chief forester in Evo Forest District and Head of Evo Forest Rangers School. From this significant position he was appointed in 1918 as Director of the recently founded Finnish Forest Research Institute and Professor of Silviculture.

At the time of his studies at Evo, Heikinheimo became deeply attached to his teacher, Doctor G. A. Blomqvist. Over the years these two men of distinction in Finnish forestry and silviculture developed a lasting friendship. It was evidently Blomqvist who encouraged Heikinheimo to consider continuating his university studies. While at Tuomarniemi, Heikinheimo passed the Master of Philosophy examination in 1911, with silviculture as his major subject. Immediately after this he began his thesis on »The Influence of Cultivation by Burning-over on Finnish Forests». This now famous research work which was often interrupted by other official duties, was

finished in 1915. The following year Heikinheimo took the Doctor of Philosophy degree. Even before this he had been a diligent writer: there are nine different publications from this period, most of them dealing with thinning.

When he became Director of the Forest Research Institute, Olli Heikinheimo was 36, a man in his best years, ready and eager to accomplish the duties awaiting him as Director and professor. He had a firm foundation for his new post: 14 years of practical and administrative experience in responsible forestry work, a widely acknowledged dissertation and a Doctor of Philosophy degree.

The newly founded Forest Research Institute began its activity according to the system and spirit of A. K. Cajander, who held that the head of a scientific institute should be only the first among equals, primus inter pares. This principle Heikinheimo practised all his life. During the early years in particular, he saw his duties as involving active research, into which he entered with enormous energy and productivity. In the space of three years, four major research publications were issued. They dealt with different aspects of the spruce in northern Finland — a problem as problematical and topical then as today.

In Heikinheimo's scientific production, the problems were almost always taken from reality and, as with many other forest scientists, Heikinheimo gathered his mental stimulus from the satisfaction he gained when he observed that he contributed to his own field of knowledge. It is worth noting that the young generation of forest researchers has rediscovered Heikinheimo; publications covered with dust have been dug out from the library shelves, and Heikinheimo's work regarding nursery techniques and planting and seeding methods are actively used at the present time, especially that on the spruce stands of northern Finland.

The Forest Research Institute and Finnish forestry will remember Heikinheimo not only as a researcher but also as a great builder. During the more than 30 years that Heikinheimo worked as the Director of Forest Research Institute, the Institute grew into one of the biggest research centres in Finland. The Institute developed internally and externally: internally by the establishment of a large number of research positions and the creation of more independent departments: externally above all by the building up of an extensive system of experimental areas, which were essential for the Finnish Forest Research Institute. The experimental areas were one of Heikinheimo's chief concerns, and to their establishment he applied both skill and dedication.

Heikinheimo's influence spread beyond the Forest Research Institute to the whole of Finnish forestry and its development. On forestry practice his influence was especially significant. Heikinheimo developed methods of regeneration cutting, worked for the abandonment of adverse cutting and thinning

methods, and initiated forest genetics research and tree breeding in Finland. He actively encouraged study tours for the dissemination of information on current research and on experimental results. After his retirement he wrote guidebooks for visitors to the experimental areas.

Heikinheimo was a member of many scientific societies, in some of which he held responsible posts, and was well known both at home and abroad. In particular, from 1921 to 1941 he was, longer than any one else Chairman of Suomen Metsänhoitoyhdistys, now Suomen Metsäyhdistys (The Finnish Forestry Association). At that time Heikinheimo was seen as a standard bearer for the whole profession, not only for forest officers but also for forest technicians. The improvement of the latters' social status was near his heart. He was made an honorary member of the Finnish Forestry Association. It was quite natural that Heikinheimo travelled extensively abroad; his contacts with the other Scandinavian countries were strengthened by many personal bonds of friendship. In Sweden, Norrlands Skogsvårdsförbund (Norrland's Silvicultural Association) nominated him an honorary member in 1947, and the Norsk Forstmannsforening (Norwegian Foresters' Association) a little later made him a Knight of the Green Branch.

The Finnish Forest Research Institute, and forest science and forestry in Finland will remember its pioneer with respect and gratitude.

Risto Sarvas

Olli Heikinheimon kirjallinen tuotanto

List of publications

Luetteloinut — catalogued by Lea Hovi

Lyhennyksiä — abbreviations

AFF = Acta forestalia fennica
MTA = Metsätaloudellinen aikakauskirja
Metsätaloudellinen aikakauslehti
MTJ = Metsätieteellisen koelaitoksen julkaisuja
Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja
Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja
Communicationes Instituti Forestalis Fenniae
SF = Silva fennica

1905

Harvennus vaiko harsinta. Metsänystävä 11, s. 93—96.
Harvennushakkauksista. Suomen Metsänhoitoyhd. julk. XXII, s. 153—186, 245—290.

1906

Ensimmäiset metsänhoidolliset jatkokurssit Tuomarniemen metsänvartijakoulussa. Metsänystävä 12, s. 103—106.
Harvennushakkauksista ja niiden merkityksestä metsätaloudessa. Suomen Metsänhoitoyhd. käsikirjasia. Uusi sarja 1. 46 s.
Metsän arvon laskemisesta. Metsänystävä 12, s. 150—166.
Otteita Metsähallituksen kertomuksesta vuodelta 1904 ja muutamia mietteitä sen johdosta. Metsänystävä 12, s. 214—226.

1907

Harvennushakkauksista ja niiden merkityksestä metsätaloudessa. 2. p. Suomen Metsänhoitoyhd. käsikirjasia. Uusi sarja 1. 48 s.
Metsämaan erilainen muokkaus ja apulanta-aineiden käyttäminen taimiston kasvun edistämiseen. Metsänystävä 13, s. 208—213.
Om gallringshyggen och deras betydelse i skogshushållningen. Finska Forstföreningens handböcker 1. 48 s.
Piirteitä metsiemme kehityshistoriasta. Metsänystävä 13, s. 363—370, 410—417.

1910

Harvennushakkaukset. Maahenki II, s. 662—680.
Den nya arrendelagen och arrendelägenheternas skogsbruk. Uppsatser i skogsbruk 1, s. 75—78.
Uusi maanvuokra-asetus ja vuokratilojen metsänkäyttö. Tapio 3, s. 51—56.

1911

[Kirja-arvostelu.] Purhonen, O. A. Tauluja metsänomistajille ja metsänhoitomiehille metsätulojen selvittämiseksi. Tapio 4, s. 51—53.
Näkökohtia Lapinmaan metsä- ja asutusoloista. Referat: Geschichtspunkte über die Wald- und Wohnverhältnisse Lapplands. Suomen Metsänhoitoyhd. julk. 28, s. 213—242.
Puutavaraliikkeenharjottajan omista metsistä saatujen tulojen kunnallisverotus. Tapio 4, s. 116—119.
Voimaperäinen metsänhoito ja sen toteuttamisen mahdollisuudet meillä. Tapio 4, s. 368—372.

1912

Apuharvennuksia toimittamaan. Tapio 5, s. 323—328.
Metsämaitten kosteussuhteista. Referat: Untersuchungen über den Feuchtigkeitsgrad trockener Heideböden. Suomen Metsänhoitoyhd. julk. 29, s. 443—461, 505—506.
Metsänhoidolliset pää- ja sivuhakkaukset. Tapio 5, s. 1—12.
Der niedere forstliche Unterricht in Finnland. Suomen Metsänhoitoyhd. julk. 29, s. 548—552.
Ohjeita metsänkäytön järjestämisessä yksityistiloilla. Tapio 5, s. 163—167, 195—198.
Skogsbrukets ordnande å privata lägenheter. Uppsatser i skogsbruk 3, s. 145—154.

1913

[Kirja-arvostelu.] Valmari, J. ja Vainio, V. Puun hiilto. Tapio 6, s. 163—164.
Miten halkopino on tehtävä. Tapio 6, s. 117—120.
Sahatukkien hinnoittaminen. Tapio 6, s. 276—280, 347—348.

1915

Einige Beobachtungen über die Aufarbeitung und Verwahrung des Brennholzes. AFF 4.3. 6 s.
Kaskiviljelyksen vaikutus Suomen metsiin. (Diss.) Referat: Der Einfluss der Brandwirtschaft auf die Wälder Finnlands. AFF 4.2. IV, 264, 149, 59 s., (59) kuval., 4 karttal. & Metsähallituksen julk. II. [Ohne Referat.] IV, 264, 149 s., (59) kuval., 4 karttal.

1916

Kaskiviljelys uudelleen käytäntöön. MTA 33, s. 147—156.

1917

Föryngring av skog genom skott. Uppsatser i skogsbruk 8, s. 53—64.
Metsien uudistuminen vesojen avulla. Tapio 10, s. 33—38, 73—78.
Metsänhävityksen ja polton vaikutuksesta metsämaahan. AFF 8.3. 28 s.

1918

Uudistuksia 2-vuotisten metsäkoulujen toiminnassa. Tapio 11, s. 225—228.

1919

Kehoittaako kotimaisten havupuiden keinotekoisessa uudistamisessa saatu kokemus jatkamaan näiden puulajien viljelyä? MTA 36, s. 294—298.
Keinotekoiset metsänuudistukset. Tapio 12, s. 193—198, 209—213.
Skogskulturer. I. Skogskulturer i Finland nödvändiga. II. Resultaten av i Finland verkställda skogskulturer överhuvudtaget goda. Uppsatser i skogsbruk 10, s. 161—170.

1920

Kuusen iän määräämisestä ja kuusen myöhäisjuurista. Referat: Über die Bestimmung des Alters der Fichte und ihre Adventivwurzeln. MTJ 2.3. 29, 6 s.
Kuusimuodoista ja niiden metsätaloudellisesta arvosta. Referat: Über die Fichtenformen und ihren forstwissenschaftlichen Wert. MTJ 2.2. 102, 11 s., (12) kuval.
Pohjois-Suomen kuusimetsien esiintyminen, laajuus ja puuvarastot. Referat: Vorkommen, Umfang und Holzvorräte der Fichtenwälder in Nord-Finnland. AFF 15.1. 170 s., 1 karttal. & MTJ 3.2. 170 s., 1 karttal.
Suomen lumituhoalueet ja niiden metsät. Referat: Die Schneeschadengebiete in Finnland und ihre Wälder. MTJ 3.3. 134, 17 s., 16 kuval.

1921

Metsätieteellisen koelaitoksen tähänastinen toiminta ja vastaiset työsuunnitelmat. MTA 38, s. 47—50.
Suomen lumituhoalueet ja niiden metsät. Terra 33, s. 1—7.
Suomen metsärajametsät ja niiden vastainen käyttö. Referat: Die Waldgrenzwälder Finnlands und ihre künftige Nutzung. MTJ 4.3. 71, 20 s.
Über die Schutzwaldfrage. Referat aus »Suojametsäkysymyksestä I/VI» von August Renvall. AFF 11, Supplementum. 12 s.
Ylemmän maa- ja metsätalousopetuksen uudelleen järjestestäminen. MTA 38, s. 239—240.

1922

Forestry in Finland. (Yhdessä Eino Saaren kanssa). AFF 19.1. (4), 42 s., 5 kuval.
Metsätalous- ja puunjalostusteollisuusosastot. Suomen XII yleinen maatalousnäyttely Tampereella 21—30 p:nä kesäk. 1922. Kertomus, s. 378—384.
Metsätaloustuotannon kehittäminen. Maatalous 15, s. 490—496.
Metsätuotannon kehittäminen. Metsämies 13, s. 111—119.
Metsätuotannon kehittämisestä. Suomen XII yleinen maatalousnäyttely Tampereella 21—30 p:nä kesäk. 1922. Kertomus, s. 504—510. & Tapio 15, s. 101—107.
Männyn ja kuusen siemenen laadusta eri osissa maata. Tapio 15, s. 142—146.
Pohjois-Suomen kuusimetsien hoito. Referat: Über die Bewirtschaftung der Fichtenwälder Nordfinnlands. MTJ 5.2. 132, III s., 9 kuval.
Pohjois-Suomen kuusimetsät ja niiden hoito. Tapio 15, s. 81—87.
Suomen metsät ja metsätalous. (Yhdessä Eino Saaren kanssa). AFF 19.1. (4), 41 s., 5 kuval.
Suomen suojametsät. Tapio 15, s. 49—55.

1923

Jalostamattoman puutavaran vientitulleista ja vientimaksuista. MTA 40, s. 125—126.
Metsätieteellisen koelaitoksen kokeilualueet. Tapio 16, s. 67—71.
Suomen lehtipuumetsät sekä faneeri- rulla- ja tulitikkuteollisuus. Tapio 16, s. 97—101.

1924

Forstvetenskapliga försöksanstaltens försöksområden. Forstlig tidskrift 41, s. 30—35.
Karjan laiduntaminen ja metsätalous. Talonpoika I. Lounais-Suomi, s. 98—106. Turku.
Skogarnas forstliga tillstånd i Finland. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 11 s., (6) kartta- ja kuval.
Suomen metsien metsänhoidollinen tila. MTJ 9.4. 12 s., (6) kuva- ja karttal.
Taxeringen av rikets skogar. (Yhdessä Yrjö Ilvessalon kanssa). Odalmannen 1924, s. 220—223.
Tämän talvisen männyn siemenen laatu. Tapio 17, s. 30—35.

1925

Die Gründung der forstwissenschaftlichen Versuchsanstalt Finnlands und ihre Tätigkeit. Vorträge über die Waldwirtschaft und Forstwissenschaft in Finnland, s. 20—24. Hki.
Selostus metsätieteellisen koelaitoksen toimesta suoritetuista tutkimuksista, jotka koskevat rautateillä kuletettavien puutavaroiden painoa. MTA 42, s. 127—130.
Tietoja v. 1924—25 männyn ja kuusen siemenen laadusta. Tapio 18, s. 111—113.

1926

Die Forstwissenschaftliche Versuchsanstalt Finnlands, ihre Gründung und ihre Tätigkeit. Mitteilungen der Deutschen Dendrologischen Gesellschaft XXXVI, Bd. I, s. 87—90.
Kasvusuhteet ja siemenvuosi. Tapio 19, s. 7—9.
Myrskytuhoista Raivolan lehtikuusimetsässä syyskuun 23 päivänä 1924. Referat: Über die Sturmschäden in dem Lärchenwalde bei Raivola am 23. September 1924. MTJ 12.2. 52 s., 6 kuval.
Tal vid skogsdagarnas öppnande 26. III. 1926. Forstlig tidskrift 43, s. 2.
Tuloksia Suomessa toimitetuista metsänviljelyksistä. Tapio 19, s. 97—104.

1927

Beskrivning över Raivola lärkskogsområde. Ill. av Lennart Sergerstråle. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 39 s., (1) karttal.
Kasvusuhteet ja siemenvuosi. Tapio 20, s. 6—8.
Metsänhoitotekniikasta. Suomen Metsänhoitoyhdistyksen kokouksessa 18. 12. 1926 pidetyn esitelmän mukaan. MTA 44, s. 49—55.
Punkaharju. Ill. av Lennart Segerstråle. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 46 s., (1) karttal.
Punkaharju. Kuv. Lennart Segerstråle. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 46 s., (1) karttal.
Punkaharjun kokeilualueen metsät ja metsätalous. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 49 s., (1) karttal.
Raivolan lehtikuusimetsän alue. Kuv. Lennart Segerstråle. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 39 s., (1) karttal.
Skogarna och skogshushållningen å Punkaharju försöksområde. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 50 s., (1) karttal.

1928

Kasvusuhteet ja siemenvuosi. Tapio 21, s. 10—16.
Metsätalouden voimaperäistyttämisestä yksityismailla. Viides maatalousviikko Helsingissä 12—16 p:nä jouluk. 1927, s. 224—235. Porvoo.
Punkaharjun metsätieteellinen kokeilualue. Maatalous 21, s. 335—338.
Suomen metsien metsänhoidollinen tila. Maa ja metsä IV. Metsätalous I, s. 75—78. Porvoo—Hki. WS.
Toisen pohjoismaisen metsäkongressin asiakirjat 1927. Andra nordiska skogskongressens förhandlingar 1927. Toim./red. av O. Heikinheimo. 113 s., (18) kuval. Hki.

1929

Ist es zweckmässig, die forstlichen Versuchsanstalten mit einigen Waldgebieten zu versehen? Verhandlungen des Internationalen Kongresses Forstlicher Versuchsanstalten Stockholm 1929, s. 118—123. Sthlm.
Kasvusuhteet ja siemenvuosi. Tapio 22, s. 13—15.
Der Lärchenwald von Raivola. [Julk. Metsäntutkimuslaitos.] 37 s., (1) karttal.
Metsäteknologisen ja puunjalostusteknillisen tutkimuksen tarpeellisuus. MTA 46, s. 90—94.
Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen Punkaharjun kokeilualue. Talonpoika VI. Itä-Savo, s. 87—97. Porvoo.

1930

Kaatoajan vaikutus lehtipuiden vesojen syntyyn ja kasvuun. Tapio 23, s. 113—117.
Mitä yksityismetsien hakkaustilasto meille kertoo. Tapio 23, s. 153—158.
Muudan 100-vuotismuisto. MTA 47, s. 98—100.

1931

Forstliga forskningsanstaltens uppkomst, utveckling, arbetsmetoder och dess verksamhet hittills. Skogliga meddelanden I, s. 3—9.
Metsien luontainen uudistaminen. Keskusmetsäseura Tapion käsikirjasia 22. 90 s.
Metsätieteellinen tutkimuslaitos ja sen tähänastinen toiminta. Metsätietoa I, s. 1—10.
Milloin ja missä muodossa meillä on käytettävä metsänviljelyksiä. MTA 48, s. 71—73.
Männyn ja kuusen käpyjen runsaus kevättalvella 1931. Metsätietoa I, s. 34—38.
Streck-rutsådd, en skogskulturmetod som kan förordas. Skogliga meddelanden I, s. 27—39.
Syyt Suomen metsien epätyydyttävään metsänhoidolliseen tilaan. Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja I, 1931, s. 18—35.
Vako-ruutukylvö, suositeltava metsänkylvömenetelmä. Metsätietoa I, s. 45—56.

1932

Metsäpuiden siementämiskyvystä. I. Referat: Über die Besamungsfähigkeit der Waldbäume. I. MTJ 17.3. 61 s.
Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen metsänviljelykset. Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja II, 1932, s. 41—54.
Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen näyttelyosastot. MTA 49, s. 134—139.
Skogarnas naturliga föryngring. Centralskogssällskapets Föreningen för Skogskultur skriftserie 3. 90 s.

Tuloksia metsänviljelysmenetelmiä koskevista kokeista. Metsätietoa I, s. 134—150.
Vuosi 1932 männyn ja kuusen siemenvuotena ja sen antama opetus. Metsätietoa I, s. 92—114.

1933

Metsätalous ja puunjalostusteollisuus. Suomalainen suurnäyttely. Selostus ja kuvia Suomen XIII yleisestä maatalousnäyttelystä Viipurissa 1932, s. 69—71. Porvoo.
Streck-rutsåddmetoden och vid densamma erforderliga redskap. Forstlig tidskrift 50, s. 11—15.
Vako-ruutukylvö ja siinä tarvittavat työvälineet. [Julk.] Uittokalusto Oy. 6 s. Hki.
Visakoivumetsien perustaminen ja kasvattaminen. Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja III, 1933, s. 27—46.
Vuosi 1933 männyn ja kuusen siemenvuotena sekä lisähavaintoja havupuiden siementen tuleentumisesta. Metsätietoa I, s. 188—195.
Vuosikokouksen avauspuhe. Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja III, 1933, s. 13—15.

1934

Metsänviljelysmenetelmiä koskevista tutkimuksista. Referat: Über die Forschugnsarbeit betreffend die Waldkulturmethoden. AFF 40.23, s. 565—573, (3) kuval.
Puun taimien kasvattamisesta. Metsälehti n:o 50, s. 9—10, n:o 51—52, s. 11—12.
Vuosi 1934 männyn ja kuusen siemenvuotena. Metsätietoa I, s. 285—290.

1935

Kuusen keinollisesta uudistamisesta. Metsälehti n:o 1, s. 4—5, 8.
(Lausunto Maatalous-metsätieteelliselle tiedekunnalle metsänhoidon professuuria hakevista tohtoreista Erkki Laitakari ja Martti Tertti). Asiakirjoja yliopistoasioissa 1935, s. 46—66. Hki.
Metsäpuiden karsimisesta. Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja V, 1935, s. 73—85.
Pohjois-Suomen metsätaloudelliset pulmat. Metsälehti n:o 51—52, s. 4—5.
Suomen eteläpuoliskon kasvullisten metsämaiden vastaisista puulajeista. Metsämies 26, s. 31—37.
Taimitarhan lannoittamisesta. Metsälehti n:o 22, s. 6—7.
Uusia puun karsimisvälineitä. Metsälehti n:o 23, s. 4—5.
Vuosi 1935 männyn ja kuusen siemenvuotena. Metsätietoa I, s. 378—382.

1936

Harvennus- ja väljennyshakkuiden tarpeellisuus. Metsälehti n:o 47, s. 4—5.
Maantiepölyn sitomiseen käytetyn kalsiumkloridin vaikutus tien vierellä oleviin puihin. MTA 53, s. 244—245.
Männyn, kuusen ja koivun siemenvuosien kertautuminen ja teho. Yksityismetsänhoitajayhd. vsk. IX, 1936, s. 73—81.
Om masurbjörken och dess odlingsmöjligheter. Skogsägaren 12, s. 133—138.
Puiden karsimisesta. MTA 53, s. 153—154.
Tuloksia visakoivun viljelystä. MTA 53, s. 12—17.
Vuosi 1936 männyn ja kuusen siemenvuotena. Metsätietoa II, s. 17—22.
Yhteistoiminta yksityismetsätalouden alalla Ruotsissa. Metsälehti n:o 12, s. 4.
Yksityismetsissä käytettävien hakkausmenetelmien yleisistä perusteista. MTA 53, s. 213—217.

1937

Metsäpuiden siementen laadun muuttuminen siemeniä varastoitaessa. MTA 54, s. 5—8.
Metsäpuiden siementuotosta. Metsätietoa II, s. 97—108.
Metsäpuiden siementämiskyvystä. II. Referat: Über die Besamungsfähigkeit der Waldbäume. II. MTJ 24.4. 67 s.
Miten metsiä on hakattava? Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja VII, 1937, s. 83—104.
Viides pohjoismainen metsäkongressi. MTA 54, s. 126—136.
Vuosi 1937 männyn ja kuusen siemenvuotena. Metsätietoa II, s. 121—126.

1938

Arboretum Mustila. An interesting silvicultural experiment with foreign trees in Finland. Finnish Trade Review 37, s. 16—18.
Hakkausalojen jälkikunnostus. I—II. Metsälehti n:o 45, s. 4—5, n:o 46, s. 4—5.
Harvennushakkauksista. Referat: Die Durchforstungen. SF 46, s. 84—98, 240. & Metsänhoitajien jatkokurssit 1937, III, s. 84—98, 240.
Laiduntamisen puuntaimistoille aiheuttamista tuhoista. MTA 55, s. 16—19.
Metsäpuiden jalostamisesta. Metsälehti n:o 14, s. 4—5.
Metsäpuiden karsiminen. Metsämies 29, s. 291—292.
Metsäpuiden karsimisesta. Keskusmetsäseura Tapion käsikirjasia 25. 16 s.
The most valuable forest in Fenno-Scandinavia. Finnish Trade Review 37, s. 21—22.
Om efterarbeten å hyggesytor. Skogsbruket 8, s. 260—268.
Om uppkvistning av skogsträd. Skogsbruket 8, s. 143—150.
Puiden karsiminen. Tapion taskukirja. 8. p. S. 66—67.
Puiden siemen ja siemenvuodet. Tapion taskukirja. 8. p. S. 63—66.
Puun siemenen alkuperän merkityksestä. Metsälehti n:o 13, s. 7—8.
Tuloksia visakoivun viljelystä. MTA 55, s. 197—198.

1939

The Forest Research Institute of Finland and the activities from 1918 to 1938. MTJ 28.1. 39 s.
Kokemuksia paksusammaltyypin metsien käsittelystä. Referat: Erfahrungen betreffend die Behandlung der Wälder vom Dickmoostyp. SF 52, s. 121—139, 292. & Metsänhoitajien jatkokurssit 1938, IV, s. 121—139, 292.
Metsäpuiden roduista ja niiden jalostamisesta. Esitelmä [Suomen Metsänhoitoyhdistyksen] syyskokouksessa 1937. Suomen Metsänhoitoyhd. vsk. Uusi sarja VIII, 1938, s. 13—44.
Metsätalous ja matkailu. Referat: Die Forstwirtschaft und der Touristenverkehr. SF 52, s. 91—104, 291. & Metsänhoitajien jatkokurssit 1938, IV, s. 91—104, 291.
Männyn karisteen, (*Lophodermium pinastri*) tuhojen riippuvaisuus männyn taimien ja karisteen roduista. MTA 56, s. 24—26.

1940

Havaintoja visakoivun kasvattamisesta. MTA 57, s. 41—46.
Iakttagelser rörande uppdragning av masurbjörk. Skogsbruket 10, s. 115—123.
Markens intensiva utnyttjande är dagens lösen för skogshushållningen. Skogsbruket 10, s. 256—263.
Metsäpuiden siemensadot vuosina 1940—41 ja 1941—42. Metsälehti n:o 44, s. 4—6.

Metsäpuiden taimien kasvatus taimitarhassa. Referat: Versuche in Baumschulen. MTJ 29.1. 97 s.
Om odling av masurbjörk. Skogen 27, s. 165—167.
Raivola, ett förlorat kulturminne. Ur »Beskrivning över Raivola lärksområde» av Olli Heikinheimo, 1927. Skogsbruket 10, s. 140—147.
Tehostettu maankäyttö metsätaloutemme nykyhetken tunnus. Metsälehti n:o 41, s. 4—5.
Uudistusalojen maanpinnan käsittely ja taimettuminen. MTA 57, s. 195—202.

1941

Kuusen kylvöstä ja sen edellytyksistä. MTA 58, s. 193—200.
Metsänhoito. Tapion taskukirja. 10. p. S. 44—61.
Metsänistutusmenetelmistä. Referat: Versuche mit waldbaulichen Pflanzmethoden. MTJ 29.4. 63 s.
Metsänviljelysmenetelmistä 1—2. Metsälehti n:o 19, s. 4—5, n:o 20, s. 4.
Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen kokeilualueet sodan jaloissa. Metsälehti n:o 43, s. 1, 4—5.
Minkälaiset mahdollisuudet on saada uutta männyn ja kuusen siementä? Metsälehti n:o 51—52, s. 2.
Om föryngringsytornas behandling och föryngringens uppkomst. Skogsbruket 11, s. 69—79.
Puiden karsiminen. Tapion taskukirja. 9. p. S. 61—62.
Visakoivun kasvattaminen. Metsämies 32, s. 4—5.

1942

Die Forstliche Forschungsanstalt Finnlands und ihre Tätigkeit. Internationaler Holzmarkt n:o 21/22, s. 12—14.
Die Forstliche Forschungsanstalt Finnlands und ihre Tätigkeit in den Jahren 1918—1938. 27 s. [Moniste.]
Hytermän luonnonsuojelualue. Metsälehti n:o 25—26, s. 8, 13.
Miten perustan mahdollisimman hyvätuottoisen kuusimetsän? Metsälehti n:o 51—52, s. 6—7.
Om skogskulturmetoder. Skogsbruket 12, s. 159—163.
Wertvolles finnisches Tischlerholz. Internationaler Holzmarkt n:o 21/22, s. 44—45.

1943

Aulangon kansallispuisto. Aulanko nature park. Suomen Luonto 3, Suomen Luonnonsuojeluyhd. vsk. 1943, 1944, s. 20—25.
Havupuiden käpy- ja siemenvuosi. Metsälehti n:o 47, s. 1.
Nykyiset hakkuut ja metsänhoito. Metsälehti n:o 13—14, s. 10—11.
Skyldighet att iståndsätta skogar i underproduktion. Skogsbruket 13, s. 268—272.
Vajaatuottoisten metsien kunnostamisvelvoitus. MTA 60, s. 175—179. & Metsämies 34, s. 257—262.

1944

Asutus ja metsä. Suomen metsätaloudellisten järjestöjen julkaisema ja prof. Olli Heikinheimon toimittama. 24 s. Hki.

Kolonisationen och skogen. Utg. av Finlands skogshushållningsorganisationer och red. av O. Heikinheimo. 24 s. Hfors.
Metsien käsittely poikkeuksellisissa oloissa. Kansanhuoltoministeriön julkaisema. 48 s. Hki.
Metsien käsittely poikkeuksellisissa oloissa. Metsälehti n:o 27—28, s. 7.
Metsien luontainen uudistaminen. 2. p. Keskusmetsäseura Tapion käsikirjasia 22. 96 s.
Metsänhoito. Tapion taskukirja. 10. p. S. 54—72.
Skogarnas behandling under nu rådande undantagsförhållanden. Översättning från finskan av Jarl Lindfors. 48 s. Hfors.

1945

Metsäpuiden rodut, metsänhoito ja kasvinjalostus. MTA 62, s. 117—124.
Metsäpuiden siemenen hankinta. Metsälehti n:o 22, s. 2.
Organiseringen av skogsfröanskaffningen. Skogsbruket 15, s. 115—118.
Trädraser, skogsskötsel och rasförädling. Skogsbruket 15, s. 119—207.

1946

Lajiteltujen taimien käyttäminen metsänistutuksiin. Metsälehti n:o 21, s. 4—5.
Lisähavaintoja kuusen istutusmenetelmistä. Metsälehti n:o 22—23, s. 4.
Tuloksia metsäpuiden maantieteellisten rotujen koeviljelyksistä. Metsälehti n:o 39, s. 4—5.
Vid vilken tidpunkt bör tall- och grankott insamlas för anskaffande av frö? Skogsbruket 16, s. 296—298.
Våra skogsträds fröskörd. Skogsbruket 16, s. 298—299.

1947

Användningen av sorterade plantor vid skogsodlingar. Skogsbruket 17, s. 154—156.
Metsänhoito. Tapion taskukirja. 11. p. S. 50—69.
Metsäpuiden rodunjalostus. Metsälehti n:o 7, s. 4—5.
Männyn ja kuusen siemenvuodet ja siemensadot. Metsälehti n:o 13—14, s. 5.
Resultat av försöksodlingar med skogsträdens geografiska raser. Skogsbruket 17, s. 158—161.
Skogsträdens rasförädling. Skogsbruket 17, s. 77—79.
Ytterligare iakttagelser angående planteringsmetoderna för gran. Skogsbruket 17, s. 156—157.

1948

Frösättning och fröår. Norrlands Skogsvårdsförbunds tidskrift 1948, s. 77—96. & Skogsbruket 18, s. 33—41.
För våra förhållanden lämpliga metoder vid förnyelsehuggning. Skogsbruket 18, s. 329—332.
Hakattavan puuston osoittaminen ja arvioiminen. Metsälehti n:o 9, s. 4—5.
Metsien luontainen uudistaminen. 3. p. [Julk.] Keskusmetsäseura Tapio. 95 s. Hki.
Metsäpuiden siementämiskyvystä. III. Summary: On the seeding capacity of forest trees. III. MTJ 35.3. 15 s.
Metsätaloudelliset näkökohdat ja keskitetyt hakkuut. SF 64, s. 5—15. & Metsänhoitajien jatkokurssit 1947, V, s. 5—15.

Metsätyömies ja hänen työnsä. Metsälehti n:o 7, s. 4.
Perä-Pohjolan ja Lapin metsätaloudesta. SF 64, s. 48—59. & Metsänhoitajien jatkokurssit 1947, V, s. 48—59.
Suomen oloihin sopivat uudistushakkausmenetelmät. MTA 65, s. 317—319.

1949

Finska erfarenheter om arbetsfördelning och skogsvårdsarbete inom skogsförvaltningar. Svenska Skogsvårdsförbunds tidskrift 47, s. 46—52.
Forest Research Institute in Finland 1918—1948. (Yhdessä Peitsa Mikolan kanssa). MTJ 37.4. 37 s.
För våra förhållanden lämpliga metoder vid förnyelsehuggning. Norrlands Skogsvårdsförbunds tidskrift 1949, s. 188—194.
Metsän viljely. Tapion taskukirja. 12. p. S. 84—99.
Metsätieteellinen tutkimuslaitos 1918—1948. (Yhdessä Peitsa Mikolan kanssa). MTJ 37.3. 35 s.
Miten Metsätieteellinen tutkimuslaitos syntyi ja kehittyi? Metsälehti n:o 9—10, s. 4—5.
Puiden karsiminen. Tapion taskukirja. 12. p. S. 121—122.
Puiden siemen ja siemenvuodet. Tapion taskukirja. 12. p. S. 80—83.
Tuloksia kuusen ja männyn maantieteellisillä roduilla suoritetuista kokeista. Summary: Results of experiments on the geographical races of spruce and pine. MTJ 37.2. 44 s.

1950

Puusto-käsitteen analysointia. MTA 67, s. 283—284.
Tähänastinen metsäntutkimuksemme ja rodunjalostus. Summary: Forestry research and tree breeding in Finland up to the present time. MTA 67, s. 227—229, 232.

1951

Kan skogsplanteringen göras billigare? Skogsbruket 21, s. 303—305.
Kokemuksia visakoivun kasvatuksesta. Summary: Experiences in the growing of curly birch. MTJ 39.5. 26 s.
Masurbjörkodlingens problem. Skogsbruket 21, s. 273—276.
Metsänistutukset huokeammiksi ja yleisemmiksi. Metsälehti n:o 45, s. 1—2.
Metsäpuiden rodut ja siemenen hankinta. Metsätietoa n:o 3, s. 3—8.
Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen kokeilualueiden »ylijäämä». Summary: On the financing of the Finnish Forest Research Institute. MTA 68, s. 44—45.
Pihlajan puolesta. Metsälehti n:o 47, s. 4—5.
Visakoivun kasvatuksen ongelmia. Metsätietoa n:o 2, s. 3—6.

1952

Metsätieteellinen tutkimuslaitos ja sen kehittäminen. Summary: The Forest Research Institute and its development. MTA 69, s. 161—164, 226. & Metsälehti n:o 21, s. 4.

1953

Edellisen johdosta. [Vilho E. Raatikaisen »Mäntysiemenpuiden stranguloimisesta» nimisen kirjoituksen johdosta.] MTA 70, s. 292.
Eräistä metsätermeistä. MTA 70, s. 136.

Kuinka metsäviikko ajatus lähti käyntiin. Metsälehti n:o 13—14, s. 11—12.
Metsien hakkauksista yksipuolisissa menekkioloissa. Metsänhoidon professorit neuvonantajina. [Haastattelu.] Metsälehti n:o 51—52, s. 4.
Puiden keinollisesta karsimisesta. Summary: Artificial pruning of trees. MTA 70, s. 399—402. (Metsätietoa n:o 2.)
Puun rungon luontaisesta karsiutumisesta. Summary: On natural pruning of tree stems. MTJ 41.5. 39 s.
Puun rungon luontaisesta karsiutumisesta. Summary: Natural pruning of trees. MTA 70, s. 397—399. (Metsätietoa n:o 2.)
Ulkomaiset puut Suomessa, etenkin Uudellamaalla. Metsämies 44, s. 61—64.

1954

Kuusen siemenvuoden tehon lisääminen puuston ja maanpinnan esikäsittelyllä. Metsälehti n:o 44, s. 1—2.
Kuusen syysistutus onnistuu, mutta männyn paras istutusaika on kevät. Metsälehti n:o 37, s. 1, 6—7.
Saha- ja vaneripuiden pystyyn arvioimisesta päästävä. Summary: We should get rid of the ocular estimation of saw and veneer timber for sales. MTA 71, s. 387—388, 427.
Taimitarhan maantieteellinen sijainti, siemenen alkuperä ja istutuskaudet. Referat: Geographische Lage der Baumschule, Herkunft des Samens und Zeit der Pflanzung. AFF 61.9. 28 s.

1955

Metsänhoidon tekniikkaa taimitarhakylvöissä. Metsälehti n:o 5, s. 5.
Punkaharjun puulajipuusto. [Julk.] Metsäntutkimuslaitos. 12 s.
[Kirja-arvostelu.] Lapin metsien mahdollisuudet. MTA 72, s. 175—176.
Vesijaon kokeilualueen vaiheita. Referat: Aus der Gesichte des Versuchsforstes Vesijako. MTJ 46.2. 83 s.

1956

Metsäntutkimuslaitoksen kokeilualueita 1. Vesijako. 19 s. Irtoliite: Vesijaon kokeilualueen retkeilykohteiden selostukset. 24 s.
Metsäntutkimuslaitoksen kokeilualueita 2. Ruotsinkylä. 19 s. Irtoliite: Ruotsinkylän retkeilykohteiden selostukset. 52 s.
The experimental areas of the Forest Research Institute of Finland 2. Ruotsinkylä. 20 s.
Metsän viljely. Tapion taskukirja. 13. p. S. 96—110.
Puiden karsiminen. Tapion taskukirja. 13. p. S. 131—132.
Puiden siemen ja siemenvuodet. Tapion taskukirja. 13. p. S. 92—95.
Tuloksia ulkomaisten puulajien viljelystä Suomessa. Referat: Ergebnisse von einigen Anbauversuchen mit fremdländischen Holzarten in Finnland. MTJ 46.3. 129 s.

1957

Exotic tree species in Finnish Forestry. Finnish Paper and Timber 8, s. 22.
Hybridi, klooni, pluspuu, provenienssi. MTA 74, s. 184.
Ulkomaiset puulajit Suomen metsätaloudessa. Summary: Exotic tree species in Finnish forestry. Paperi ja Puu — Papper och Trä 39, s. 211—214, 216.
Visakoivun kasvatuksen alkuajoilta. Metsälehti n:o 52, s. 4.

1958

Metsäntutkimuslaitoksen alkutaival v. 1918. (Muistelmia 40-vuotistaipaleelta.) MTA 75, s. 227—228.
Metsäntutkimuslaitoksen kokeilualueita 3. Punkaharju. 18 s. Irtoliite: Punkaharjun retkeilykohteiden selostukset. 56 s.
Experiment areas of the Finnish Forest Research Institute 3. Punkaharju. 18 s.
Metsäntutkimuslaitoksen kokeilualueita 4. Solböle. 18 s. Irtoliite: Solbölen retkeilykohteiden selostukset. 42 s.
Prof. Risto Sarvas 50 v. MTA 75, s. 54—55.
Visakoivun kasvatuksen alkuajoilta. Visaseuran tiedonantoja 1, s. 1—6.

1959

Metsäntutkimuslaitoksen kokeilualueita 5. Vilppula. 18 s. Irtoliite: Vilppulan kokeilualueen retkeilykohteiden selostukset. 47 s.

1961

Metsäntutkimuslaitoksen kokeilualueita 6. Kivalo. 24 s. Irtoliite: Kivalon kokeilualueen retkeilykohteiden selostukset. 41 s.

1963

Finska sorteringsexperter säjer: Svenska är för många vid bordet. Sågverken 16, s. 486—487, 505.
Metsämiesmatkailijat — pysähtykää Punkaharjulla. Punkaharjun kokeilualue. Metsä- ja uittotyönjohtaja n:o 4, s. 9—11, 26.

1967

Tutkimustyölle ei riittänyt koskaan tarpeeksi aikaa. (Uranuurtajien kertomaa.) MTA 84, s. 305—306.

THE EFFECT OF SLASH ON WORK DIFFICULTY IN MANUAL PLANTING

A sub-project of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues

PENTTI HAKKILA

HAKKUUTÄHTEITTEN VAIKUTUS KÄSINISTUTUKSEN TYÖVAIKEUTEEN

Yhteispohjoismaisen hakkuutähdetutkimuksen alaprojekti

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0053-6

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

PREFACE

A joint Nordic research programme with the object of procuring additional raw material for the forest industry from logging residues was started in 1969 on the initiative of the Nordic Council. A project council subordinated to the Council for Nordic Forest Work Studies (Nordiska Skogsarbetsstudiernas Råd) was set up to supervise the work. Its members are Professor Peter Moltesen and Mr. Aage-Marcus Pedersen, from Denmark; Mr. Carl Bredberg and Mr. Bertil Nilsson, from Sweden; Mr. Kjell Wibstad, from Norway; and Professor Veijo Heiskanen as chairman and Acting Professor Pentti Hakkila as the actual project leader, from Finland.

An important sub-project of the research programme is evaluation of the consequential effects of harvesting logging residues. The phenomena involved are partly negative; the nutrient loss of forest soil, for instance, has already been studied within the Joint Nordic programme (Mälkönen 1972). On the other hand, the effects may be positive. Facilitation of reforestation work is one of them.

This investigation is the first attempt to estimate the significance of slash removal for work difficulty in reforestation. The investigation was confined to manual planting. The subject will be expanded later to take in mechanized planting as well. In addition, the role of harvesting stump and root wood in natural and artificial regeneration will be examined.

The field work for the time studies was led by Mr. Markku Mäkelä and Mrs. Anita Törn. The pulse rate studies were conducted by Mr. Kari Sauvala and Mr. Sauli Takalo. The magnetic tapes of the pulse rate measurements were interpreted at the Institute of Occupational Health. Mr. Pentti Jämsén and Mr. Juhani Siikavirta did the planting.

Assistance in planning the investigation was given by Mr. Sven-Eric Appelroth, Mr. Klaus Rantapuu and Mr. Veli Siitari. Mr. Kauko K. Luoma and Mr. Kalevi Louho assisted in the organisation of the field work. In the finishing phase of the project the following also participated in the work: Miss Leena Paumola, Mrs. Aune Rytkönen, Miss Pirjo Salonen and Miss Raija Siekkinen.

The manuscript was translated into English by Miss Päivikki Ojansuu and Mr. L. A. Keyworth.

I extend my best thanks to all those who participated in the study.

Helsinki, January 1973

Pentti Hakkila

CONTENTS

	Page
1. Introduction	7
2. Material	9
21. The outer conditions	9
22. The experimental design	10
23. Planting tools and workers	13
3. Methods	15
31. Time studies	15
32. Pulse rate studies	16
4. Results	19
41. The structure of the work time	19
42. Time consumption	21
421. Moving	21
422. Removal of slash	22
423. Hoeing the planting hole	23
424. Planting proper	24
425. Total productive time	25
43. Work strain	26
44. Output	29
5. Summary	31
Literature	33
Lyhennelmä	35

1. INTRODUCTION

The most important of the factors affecting the work difficulty in manual planting are soil class, stoniness of the soil, thickness and hardness of the humus layer, ground vegetation, slope of the terrain, weather conditions, and slash (cf. Herranen 1969). Slash differs from the rest of these factors in that its amount can be influenced by selection of the logging method.

Slash slows movement in manual planting and adds an entirely new phase to the work, that is removal of slash from the planting site. If slash is abundant it may interfere with the making of the planting hole and the planting of the seedling even after the limited removal. In addition to reducing the work performance, it may have influence on the mental and physical strain. In mechanized planting slash slows tractor movements, interferes with the making of a furrow or planting hole and with planting the seedling, may cause mechanical breakdowns and is a risk factor for the worker seated in the machine.

Slash may also affect the quality of the work. It is important, too, for the development of the seedlings as it affects the ground vegetation and the microclimate.

Slash removal thus has a noteworthy position in reforestation work. It has therefore been considered necessary to include a study of these questions in the joint Nordic research programme for the utilization of logging residue. The profitability and meaningfulness of the utilization of logging residues depend partly on various consequential effects the existence of which cannot be disregarded in an overall project.

This study is confined for cost reasons to the manual planting of 2/2-year-old Norway spruce seedlings (*Picea abies* (L) Karst.) with the tool, a semi-circular hoe, most commonly used in Finland. However, the results probably give some idea of the effect of slash on the manual planting of other types of seedlings, too. A separate report will be required on mechanized planting.

The investigation was so organised that its results can be applied to as many cases as possible. With this in mind, the effect of slash was studied not only on total working time but also on the individual work phases. Familiarity with the structure of the work facilitates the application of the results to different conditions. It was also considered necessary to measure the work strain, for time study

alone does not reveal the whole truth. Time studies can be supplemented by physiologic observations which aid in interpretation of their results (cf. Harstela 1969). The final target was to examine the effect of slash removal on

— the structure of the work time
— time consumption in individual work phases
— work output
— work strain
— biologic results and later growth of the seedlings.

The last sub-project, clarification of the quality of the work and the later growth of the seedlings (cf. Bäring 1967), differs in content from forest work study. Moreover, as it requires several years its results will be published separately later. The experimental plots have been placed under the Department of Silviculture, Finnish Forest Research Institute, which will complete this part of the study.

2. MATERIAL

21. The outer conditions

The investigation was conducted in the Vilppula research forest of the Finnish Forest Research Institute from September 21 to October 6, 1972. Although this was rather late in the year, the weather conditions were satisfactory both for the planters and their work. The day temperature was 3—15° C.

Table 1. Weather conditions during the study
Taulukko 1. Sääolot tutkimuksen aikana

Date *Päivämäärä*	Temperature, °C — *Lämpötila, °C*		
	At 09.00 hours Kello 9.00	At 12.00 hours Kello 12.00	At 15.00 hours Kello 15.00
21. 9.	9.9	13.4	14.7
22. 9.	9.7	10.1	9.8
25. 9.	9.2	10.9	11.4
26. 9.	10.2	11.6	9.7
27. 9.	2.5	4.8	4.5
28. 9.	5.9	6.5	6.8
29. 9.	4.6	6.7	7.0
2. 10.	7.4	9.1	9.1
3. 10.	4.7	7.0	8.6
4. 10.	7.6	7.6	7.5
5. 10.	7.6	9.2	10.9
6. 10.	4.0	5.7	6.0

The investigation area had been clear cut in winter 1972. The slash had thus been lying on the ground over the summer and the majority of the needles had already been shed. The timber had been harvested by whole-stem skidding and slash had in places been pressed tightly to the ground.

The investigation site was of *Myrtillus* type which was stony in places and somewhat paludifield elsewhere. Norway spruce was planted in the area because it suited the forest site type. The seedlings were 2/2 years old. The average height of their above-ground part was 32 cm.

167 solid cu.m. of spruce and 91 solid cu.m. of pine bole wood per hectare had accumulated from the clear cutting area. The amount of slash in the investigation area can be estimated from the formulas presented in the joint Nordic logging residue study (H a k k i l a 1971).

$$\text{Pine} \quad y = -120 + 5\,421/x_1$$
$$\text{Spruce} \quad y = -438 + 8\,710/x_1$$

y = Green weight of slash, kg/cu.m. of bole wood
x_1 = Tree height, m

The mean height of the original growing stock was 20—22 m. It can be calculated from this that the green weight of slash was 170 kg for pine and 240 kg for spruce per solid cubic metre of bole wood. It can be estimated, further, that the total green weight of slash was 55 and dry weight 27 tons per hectare. There was thus a very great quantity of slash. However, its amount was considered to be only moderate in some parts of the area, corresponding to a drain of 100 solid cubic metres per hectare (cf. Savolainen 1972).

22. The experimental design

The size of the clear cutting area was 6 hectares. Five hectares were utilized for the planting experiments, divided into 20 1/4 hectare plots (Fig. 1). Slash was removed carefully from 10 randomly selected plots. The remaining 10 plots were left as they were (Figs. 2—4).

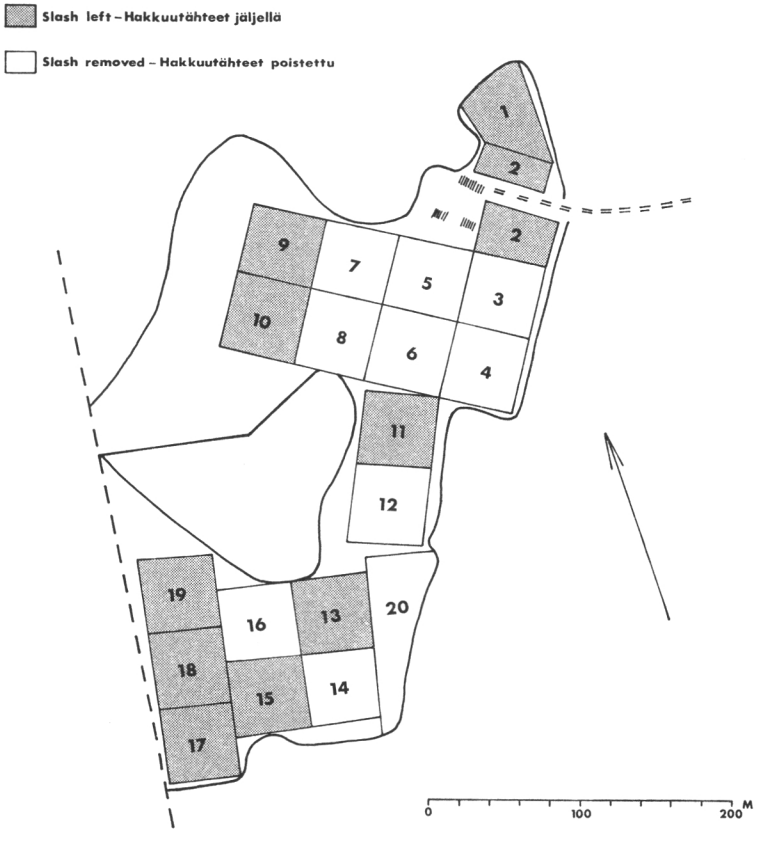


Figure 1. The experimental plots
Kuva 1. Koeruudukko.



Figure 2. Experimental plot No. 10. Amount of slash abundant.
Kuva 2. Koeala 10. Hakkuutähteitä runsaasti.



Figure 3. Experimental plot No. 15. Amount of slash moderate.
Kuva 3. Koeala 15. Hakkuutähteitä kohtalaisesti.



Figure 4. Experimental plot No. 7. Slash removed.
Kuva 4. Koeala 7. Hakkuutähteet poistettu.

The primary purpose of the study was to examine the effect of slash on work difficulty in manual planting. The experimental plan was made accordingly. But it was not possible to control topographical irregularities, soil type and stoniness, ground vegetation and other factors. It was sought to eliminate the effect of these factors on the main target through duplication: 10 slash-free plots and 10 uncleaned plots. It could be concluded from the later statistical analysis of the results that the irregular variation of other factors did not mask the effect of slash in the time studies. On the contrary, it seems rather that this tends to strengthen the general applicability of the main results.

The spacing of the seedlings was 2 × 2 m. This gave room for approx. 625 seedlings in each experimental plot. However, during the investigation phase, the number of seedlings planted was only as many as a worker could place in one day in his plot. The remainder of the plot was left empty then and planted on October 6—11.

Data on the plots are given in Table 2. The stoniness index denotes how far a steel spike sank through a surface layer 20 cm deep. It was calculated as the mean of 40 observations (cf. Viro 1958).

Table 2. Information on the experimental plots
Taulukko 2. Tietoja koeruuduista

Plot No. *Ruudun n:o*	Worker *Istuttaja*	Date *Pvm*	Surface soil *Pintakerros*	Stoniness index, cm *Kivisyys indeksi, cm*	Average slope, % *Keskim. kaltevuus, %*	Logging residue *Hakkuutähteitä*
1	1	22. 9.	Mostly peat [1])	20.0	0	Abundant [4])
2	2	25. 9.	Partly peat [2])	17.7	0	Abundant
3	1	27. 9.	Moraine [3])	14.2	0	Removed [6])
4	2	28. 9.	Moraine	14.7	0	Removed
5	2	22. 9.	Partly peat	17.5	2	Removed
6	1	25. 9.	Moraine	17.8	2	Removed
7	2	26. 9.	Partly peat	9.1	2	Removed
8	1	21. 9.	Moraine	8.2	2	Removed
9	1	26. 9.	Partly peat	9.2	2	Abundant
10	2	27. 9.	Moraine	8.9	2	Abundant
11	2	21. 9.	Moraine	7.7	0	Abundant
12	2	2. 10.	Moraine	8.8	0	Removed
13	2	29. 9.	Moraine	6.3	8	Abundant
14	1	5. 10.	Moraine	10.3	8	Removed
15	1	4. 10.	Moraine	13.4	8	Moderate [5])
16	2	4. 10.	Moraine	8.2	8	Removed
17	1	3. 10.	Moraine	14.4	8	Moderate
18	2	3. 10.	Moraine	9.8	8	Moderate
19	2	5. 10.	Moraine	11.4	0	Moderate
20	1	6. 10.	Moraine	9.8	0	Removed

1 = Pääasiassa turvetta, 2 = Paikoin turvetta ja paikoin hietamoreenia, 3 = Hietamoreenia, 4 = Hakkuutähteitä runsaasti, 5 = Hakkuutähteitä kohtalaisesti, 6 = Hakkuutähteet poistettu.

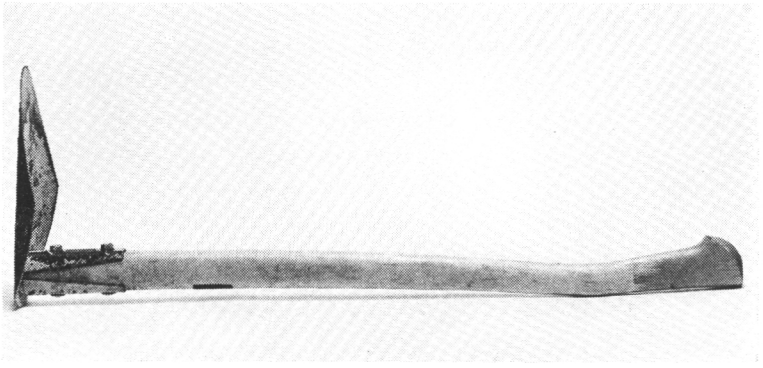


Figure 5. The semicircular hoe of Fiskars Company.
Kuva 5. Fiskars Osakeyhtiön kourukuokka.

23. Planting tools and workers

Planting was done with a semicircular hoe (Fig. 5) which is the commonest manual planting tool in Finland. The tool used was Fiskars' new model in which the blade curve is smaller than in the older model. The blade height is 26 cm, maximum width 13 cm. The wooden handle is 85 cm long and the hoe weighs 1.3 kg. The seedlings were carried in a plastic basket (Fig. 6) which accomodated about 50 seedlings.

Two workers participated in the work study. Each was to have planted 10 plots. However, one of the men fell ill, and so worker II planted 11 and worker I only nine plots.



Figure 6. Plastic basket for carrying the seedlings.
Kuva 6. Muovinen taimikori.

Employer and employees did not fix the wage rate until the first day's work was done. The work achievement on the first day was essentially smaller than later. The results of the pulse rate studies, too, are often unreliable during the first day of work because of the nervousness of the test subjects. For this reason, plots 8 and 11 planted at that time were eliminated from the statistical analyses of the main material. After the first day, piece rate wages were adopted.

Both workers had attended a forest work school. They were accustomed to planting work and did it very carefully.

Worker I was 26 years of age, height 169 cm and weight 70 kg. His work was careful and unhurried. His resting pulse rate was 42 beats per minute. He was a non-smoker.

Worker II was 28, height 164 cm and weight 59 kg. He seemed to move faster than worker I. His resting pulse rate was 55 beats per minute. He was a smoker and therefore tended to take longer breaks than worker I.

3. METHODS

31. Time studies

The aim of the time studies was to elucidate the structure of the working time, the time expenditure on individual work phases and the work output. The following time distribution was employed:

- Actual planting work
  - Moving. This comprises taking the seedling basket, moving a distance of about 2 m and placing the basket within reach of the next planting spot.
  - Removing slash. This phase consists of clearing slash from the selected planting spot by hoe or manually to the extent required for making the hole and putting the plant in it.
  - Hoeing the planting hole. This comprises removal of the humus layer (the area of humus uncovered was the minimum required for digging the hole), making the hole in mineral soil either by digging or drilling with the hoe blade and, when necessary, taking additional soil from outside the hole. In paludified soil, it was often impossible to reach the mineral layer.
  - Planting the seedling. This work phase begins by taking the seedling from the basket, continues with putting the seedling in the hole and covering the root system with loose earth. It ends with pressing down the soil around the seedling by trampling with boots.
  - Fetching the seedlings. This phase is moving from the planting spot to the seedling storage point, removing the string around the seedling bundles, filling the basket (usually with 50 seedlings) and returning to the planting spot. The seedlings were laid out in advance so that the fetching distance was almost always under 50 m.
  - Other work. This was only sharpening the hoe.
- Interruptions
  - Interruptions by the worker, exclusively rest breaks.
  - Interruptions because of the investigation. They were associated mainly with the pulse rate study.

It was considered necessary when planning the study that the planting time proper should be divided into as many phases as possible. This would permit more thorough analysis of the effect of the factor under consideration on the planting work and application of the results by combining the work phases for different cases in practice.

Distinguishing between the work phases of actual planting is difficult, often impossible, with the conventional stop-watch method. The phases change so fast that the time-keeper cannot read and record every phase. The time studies were therefore conducted by the random-sample or frequency method which was first applied in forest work study by Nisula (1962).

In this method a sound signal is given at even or uneven intervals. The research worker records the phase of work the planter is performing at the time of each signal. The entry on the blank form is made as a point of the work phase in question. This method gave the following advantages over the stop-watch procedure.

— It made it possible to distinguish between short work phases;
— The work of the time study researcher was eased and made more pleasant;
— The more even rhytm of the researcher's work reduced the possibilities of error;
— Calculation work was simplified.

It was assumed in the preliminary estimate that the planting of a seedling would require 30—70 cmin. In order to obtain one observation per seedling on average, 50 cmin was chosen as the interval between the sound signals. The signals were given from a light-weight tape recorder which the time study man carried slung over his shoulder and which played background music. The even interval of the signals was not considered to be a risk factor because planting work consists of a great number of movements and because of the variableness of the topographical factors.

The stop-watch method was used in addition to and with the random sample method. It was employed to measure the lengths and periodicity of the actual planting work, the time taken to fetch the seedlings and the breaks. These data were needed for interpretation of the magnetic tapes of the pulse rate studies. The time study man was able to interrupt his work when the planter had a break.

The statistical treatment of the time study material was performed in the PINE programme of the State Computer Centre on a UNIVAC 1108 computer. The principal method was analysis of variance to establish the effect of slash on the consumption of time on individual work phases and the difference between the planters. Stoniness, type of soil, thickness of the humus layer and slope of the terrain varied within and between the plots to such an extent that their inclusion in the variance analysis would have required a larger material. Their importance was, however, secondary for the purpose of the investigation.

32. Pulse rate studies

Work strain was studied by following the pulse rate of the heart. The greater the physical or psychic strain, the higher is the pulse rate.

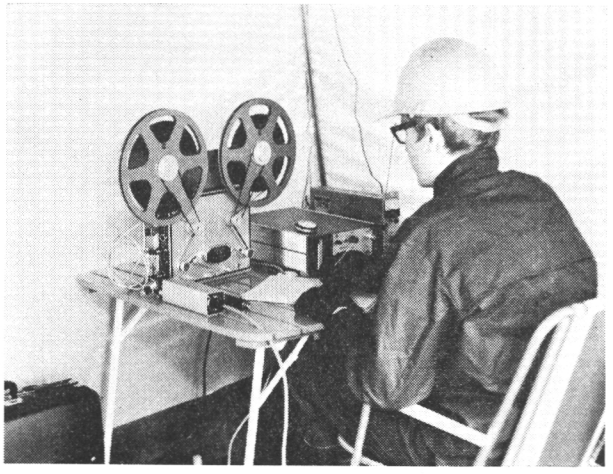


Figure 7. The field station for pulse rate measurements (photo by Hannu Kalaja).
Kuva 7. Pulssinmittausasema (kuvannut Hannu Kalaja).

Pulse rate can be measured with satisfactory accuracy manually without any special apparatus (cf. Harstela 1970), but not if continuous observations are required. The work must be interrupted for the duration of the measurements, which limits the study and makes it difficult to interpret the results. Mr. Kari Sauvala, from the Department of Forest Technology, Finnish Forest Research Institute, therefore constructed in spring 1972 an automatic remote measurement apparatus for continuous recording of the pulse rate of a worker. The first to use the apparatus was Mr. S.-E. Appelroth; the present study was performed after that. The apparatus consists of the following components (Fig. 7).

1. Transmitter. The electrical impulses produced by cardiac function are identified with three electrodes fixed to the chest of the test subject. The pulses are led by cable to the transmitter where they are amplified and transmitted by radio to the receiver. The transmitter inclusive of batteries weighs 120 g and fits in the breast pocket of a suit of overalls.

   The transmitter is battery-powered. The useful life of the batteries is 50 hours due to the small electricity drain. The transmitter must be kept inside the clothes during cold weather for it requires a temperature of 10—15°C to work. The transmission range is 300 m.

   The apparatus incorporates a set of four transmitters, each working on a separate channel. It is thus possible to equip up to four workers simultaneously with transmitters. By changing the channel of the receiver the pulse rate of any of the four test subjects can be followed, however only one worker at a time.
2. The receiver made by Medinik AB has four channels. The receiver is both AC- and DC-powered. It has a built-in oscilloscope on the screen of which the electrocardiogram, i.e. the "heart film", is seen.

A 1700 kHz oscillator which is synchronised with the pulse rate so that the pulse signal can be tape recorded is incorporated in the receiver. Another additional device is a 1 kHz oscillator which sends a signal indicating a change of channel to the tape recorder when the test subject is changed.

3. A Stellavox SP7 tape recorder for storage of the pulse rate observations. The apparatus has two channels, one for the pulse rate and the other for spoken comments and the time signal indicating a change of channel. Scotch 203 tape on 10.5 in. reels is used, recording time 3.2 hours.
4. A Honeywell Accudata 131 cardiotachometre with a 0—200 pulse per minute galvanometer. The momentary beat-to-beat pulse (20 ms—3 s) or the mean 3—5 second pulse rate can be read on this instrument.
5. A portable Honda generator which is driven by an internal combustion engine. The effect is 1.5 kW, and it gives 220 V AC for the receiver, tape recorder and cardiotachometre in field conditions.
6. Print-out apparatus of the Institute of Occupational Health which prints the pulse rate numerically at intervals of 1, 10 or 30 seconds. If required, the electrocardiogram and the mean pulse rate curve can be obtained separately at the same time. The print-out also shows the change of channel with a sign. Disturbance observations are revealed automatically.

4. RESULTS

41. The structure of the work time

Both workers expended an average of 78 % of the work time on actual planting. Slash removal slightly increased the share of planting in total time.

Fetching the seedlings took an average of 5—6 % of the work time. The share of the fetching phase is generally greater in practice (cf. Appelroth 1969, Herranen 1969), but in this case the seedlings had been spread out before the beginning of the time studies so that the fetching distance was under 50 m almost without exception. Depending on the difficulty of the terrain, the walking speed is usually 40—70 m/minute (Callin and Hansson 1959).

Fetching the seedlings took a relatively greater proportion of the time when the slash had been removed, although moving was faster. The reason was partly that since the planting work was easier in the slash-free plots the seedling basket was emptied more quickly (cf. Appelroth and Harstela 1970).

The other work was chiefly sharpening of the hoe. Its share varied irregularly by experimental plot. As sharpening was often performed because the blade had gone blunt during the preceding days, these results are not usable. Moreover, especially worker II sometimes sharpened his hoe during the meal break and then it was excluded from the time studies.

The meal break was not taken into account in the breaks, nor were interruptions that were associated with the pulse rate study apparatuses. Rest breaks averaged 15 % of the work time. The workers seemed to need more rest on plots with great amounts of slash than on slash-free plots. This was probably because of the psyhic factors.

Table 3. The structure of the work time
Taulukko 3. Työmaa-ajan rakenne

Slash — *Tähteet*	Actual planting *Istutustyö*	Fetching the seedlings *Taimien nouto*	Other work *Muu työ*	Rest *Lepo*	Total *Yhteensä*
	Proportion, % — *Osuus, %*				
Worker I — *Istuttaja I*					
Removed — *Poistettu*	78.0	6.0	2.2	13.8	100.0
Left — *Jäljellä*	77.2	4.7	2.9	15.2	100.0
Worker II — *Istuttaja II*					
Removed — *Poistettu*	80.7	7.7	0.0	11.6	100.0
Left — *Jäljellä*	75.0	3.9	1.4	19.7	100.0

Table 4. The structure of the work time in actual planting
Taulukko 4. Varsinaisen istutustyöajan rakenne

Worker I — *Työntekijä I*						Worker II — *Työntekijä II*					
Plot no. *Ruutu n:o*	Moving *Siirtyminen*	Slash removal *Tähteitten poisto*	Hoeing of hole *Kuopan teko*	Placing in the soil *Maahan pano*	Total *Yhteensä*	Plot no. *Ruutu n:o*	Moving *Siirtyminen*	Slash removal *Tähteitten poisto*	Hoeing of hole *Kuopan teko*	Placing in the soil *Maahan pano*	Total *Yhteensä*
	%						%				
Slash left — *Tähteet jäljellä*											
1	10.1	18.7	36.5	34.7	100.0	2	20.3	11.0	31.6	37.1	100.0
9	9.4	16.1	41.1	33.4	100.0	10	20.0	10.8	30.8	38.4	100.0
15	13.8	9.0	35.7	41.5	100.0	11	17.8	12.0	35.2	35.0	100.0
17	13.8	18.7	30.8	36.7	100.0	13	21.1	10.0	22.1	46.8	100.0
						18	25.1	12.2	25.4	37.3	100.0
						19	25.4	11.1	18.7	44.8	100.0
Aver.	11.8	15.6	36.0	36.6	100.0	Aver.	21.6	11.2	27.3	39.9	100.0
Slash removed — *Tähteet poistettu*											
3	10.0	—	50.1	39.9	100.0	4	23.8	—	36.0	40.2	100.0
6	10.6	—	48.3	41.1	100.0	5	14.8	—	47.7	37.5	100.0
8	13.0	—	45.4	41.6	100.0	7	21.0	—	38.7	40.3	100.0
14	17.2	—	38.1	44.7	100.0	12	21.2	—	38.6	40.6	100.0
20	19.5	—	40.4	40.1	100.0	16	24.7	—	35.6	39.7	100.0
Aver.	14.1	—	44.5	41.5	100.0	Aver.	21.1	—	39.3	39.6	100.0

The actual planting work is divided into moving, slash removal, hoeing of the hole, and planting proper. The share of the work phases varied according to the worker's method of work. For instance, careful choice of the planting spot prolonged the moving time but later eased the hoeing of the hole. Or, if slash was not removed from a sufficiently large area, the clearing time was shortened but the hoeing of the hole and placing the seedling in the soil were slowed down. The differences in the work time structure of actual planting between workers were due partly just to this (Table 4).

Removal of slash took 9—19 % of the actual planting time in the various cases. When there was no slash at all this work phase was eliminated completely and the relative share of the other phases increased correspondingly.

Moving inclusive of choosing the planting spot took 9—25 % of the actual planting time in the different plots. There was a great difference between the workers, due partly to the length of time spent on planning the work. Slash naturally slows down movements, but as it also interferes with the other work phases the share of the moving time is not greatly dependent on the amount of slash.

Slash removal increases the time available for hoeing the hole and placing the seedling in the soil. The proportion of the former grew from a good 30 to a good 40 %. That of the latter averaged 40 % and seemed to increase in consequence of slash removal only with one of the workers.

The structure of the work time shows that the work output must be greater when the slash is removed. However, only when the time consumption of the different work phases is known will it be possible to obtain a more accurate idea of how great the differences in question are.

42. Time consumption

The time consumption in actual planting is governed by several work difficulty factors. The main target of the present study was to establish the effect of slash on time consumption. The organisation of the field experiments and the statistical treatment of the material had just this aim in view.

The statistical treatment of the material is based on variance analysis in which the sources of variation are the worker with two levels and the amount of slash with three levels. In addition, the interaction could be taken into consideration. Most of the variation between plots was caused by these factors.

Hoeing the hole was, however, an exception. It is influenced strongly by the type of soil, above all stoniness and the thickness and toughness of the humus layer. Inclusion of the type of soil in the analysis of variance, however, would have required more experimental plots, which was not possible in practice. This lack does not prevent the emergence of the effect of the main target itself, slash.

421. Moving

Moving from seedling to seedling required an average of 9.0 + 1.0 cmin/seedling. This concurs with the 8.9 cmin per seedling reported by Herranen (1969). Variation between plots was explained in almost its entirety by the worker and the amount of slash.

Source of variation	SSq	D.f.	Variance	F-value
Worker	89.66	1	89.66	87.97***
Slash	22.49	2	11.24	11.03***
Interaction ..	0.43	2	0.22	0.21
Error	12.23	12	1.02	

The difference between workers was highly significant. Worker I consumed an average of only 6.8 cmin/seedling on moving. Worker II, on the other hand, needed 11.5 cmin/seedling.

*** = Significant at the 99 per cent level
** = Significant at the 95 per cent level
* = Significant at the 90 per cent level

The effect of slash on moving can be examined by eliminating the effect of the differences between the workers from the material. Slash removal speeded up moving considerably. In contrast, it was not possible with this material to demonstrate a significant difference when the quantity of slash had been classified as moderate or abundant.

Slash — *Tähteet*	Moving — *Siirtyminen* Cmin/seedling *Cmin/taimi*	Ratio *Suhde*
Removed — *Poistettu*	7.3	73
Moderate — *Kohtalaisesti*	10.0	100
Abundant — *Runsaasti*	9.8	98

422. Removal of slash

If there is slash at the selected planting spot it must be removed by hand or hoe before the hoeing of the planting hole can begin (Fig. 8). The experimental design itself led to significant differences between the plots in the time consumed on slash removal.

Source of variation	SSq	D.f.	Variance	F-value
Worker	34.43	1	34.43	19.95***
Slash	335.66	2	167.83	97.23***
Interaction	40.40	2	20.20	11.70***
Error	20.71	12	1.73	

The difference between the workers was highly significant. When the amount of slash was moderate the time spent by worker I on slash removal as 7.6 cmin/seedling. Worker II, who chose the planting spot more carefully, consumed 5.8



Figure 8. Removal of slash (Photo by Markku Mäkelä).
Kuva 8. Hakkuutähteitten raivaus (Kuvannut Markku Mäkelä).

cmin/seedling on this work phase. If a large patch is cleared in the humus layer around the seedling, the slash removal time is considerably greater (cf. Appelroth 1972). Worker I reacted more sensitively to slash; when the amount increased, he needed relatively more time for slash removal.

Slash — *Tähteet*	Slash removal — *Tähteitten raivaus* Cmin/seedling *Cmin/taimi*	Ratio *Suhde*
Removed — *Poistettu*	0.0	0
Moderate — *Kohtalaisesti*	6.7	100
Abundant — *Runsaasti*	9.9	148

In a Swedish planting study, slash removal from a circular spot of 0.8 sq.m. took 1.0 cmin/seedling if there was only a single branch to be removed. When the number of branches increased to five and on to nine the time spent on slash removal was correspondingly 6.5 and 11.5 cmin per seedling (Callin and Hansson 1959).

423. Hoeing the planting hole

The hoeing of the planting hole (Fig. 9) required 18.5 + 4.6 cmin/seedling on average. Inter-plot variation was greater than in any other work phase, but it could be explained only weakly by differences caused by the worker and slash. The differences were probably due first and foremost to stoniness and the thickness of the humus layer (cf. Herranen 1959).



Figure 9. Hoeing the planting hole. Amount of slash abundant (Photo by Markku Mäkelä).

Kuva 9. Kuopan teko. Hakkuutähteitä runsaasti. (Kuvannut Markku Mäkelä).

Source of variation	SSq	D.f.	Variance	F-value
Worker	148.14	1	148.14	6.89**
Slash	182.12	2	91.06	4.23*
Interaction ..	176.93	2	88.47	4.11*
Error	258.12	12	21.51	

The differences between the workers were significant at the 5 % risk level. Worker I spent an average of 21.8 cmin/seedling and worker II 15.6 cmin/seedling on hoeing the planting hole. Worker I appeared again to react more sensitively to slash, but the differences were not significant. The irregular variation of stoniness, thickness of the humus layer and ground vegetation masked the effect of slash if any. It has been mentioned earlier, too, that the charcteristics that represent the hardness of soil correlate poorly with the work output owing to measuring difficulties (Appelroth and Harstela 1970).

424. Planting proper

The placing of the seedling in the soil (Figs. 10 and 11) is influenced essentially by the care taken in hoeing the hole. It is important that sufficient mineral soil is reserved for covering the root system of the seedling. Slash may be assumed to influence this phase, firstly because sufficient additional soil cannot always be found, and secondly because the worker cannot work unobstructed amidst slash.

Placing in the soil took an average of 20.4 + 2.0 cmin/seedling. The variation between plots was appreciably smaller than in hoeing the planting hole. The most important source of variation was the amount of slash.



Figure 10. Placing the seedling in the soil. Slash removed.
Kuva 10. Taimen maahan pano. Hakkuutähteet poistettu.



Figure 11. Placing the seedling in the soil is completed by compacting the soil by tramping on it.
(Photo by Markku Mäkelä).
Kuva 11. Taimen maahan pano viimeistellään tiivistämällä maa saappailla polkemalla (Kuvannut Markku Mäkelä).

Source of variation	SSq	D.f.	Variance	F-value
Worker	0.53	1	0.53	0.13
Slash	182.50	2	91.25	22.61***
Interaction ..	20.93	2	10.47	2.59
Error	48.42	17	4.04	

There was no difference between the workers, nor was there any interaction. On the contrary, the effect of slash was very distinct: the work slowed down as the amount of slash grew.

Slash — *Tähteet*	Placing in the soil — *Maahan pano* Cmin/seedling *Cmin/taimi*	Ratio *Suhde*
Removed — *Poistettu*	17.5	85
Moderate — *Kohtalaisesti*	20.7	100
Abundant — *Runsaasti*	25.2	122

425. Total productive time

The total productive time in actual planting was an average of 51.9 + 6.1 cmin/seedling. The inter-worker differences which were significant in some work phases cancelled out one another in part. Workers I and II therefore achieved an equally good result on average. However, worker I reacted considerably more sensitively to slash. He benefited more from its removal and suffered more when

there was a very high amount of slash. It should be remembered, on the other hand, that worker II needed more breaks on the plots from which slash had not been removed.

Source of variation	SSq	D.f.	Variance	F-value
Worker	73.83	1	73.83	2.01
Slash	1 915.10	2	957.55	26.04***
Interaction ..	569.64	2	284.82	7.75***
Error	441.23	12	36.77	

The analysis of variance proves that the effect of slash on the time consumption in actual planting is highly significant. Work is slowed down when the amount of slash increases. On the other hand, the benefit derived from slash removal is naturally greater the higher the amount of slash originally. The benefit also depends greatly on the worker's personal qualities and working technique.

Table 5. The total productive time in actual planting
Taulukko 5. Kokonaistehotyöaika varsinaisessa istutustyössä

Amount of slash — *Tähteitten määrä*	Worker I *Istuttaja I*	Worker II *Istuttaja II*	Average *Keskimäärin*
	Total productive time, cmin/seedling *Kokonaistehotyöaika, cmin/taimi*		
Removed — *Poistettu*	39.1	47.8	43.5
Moderate — *Kohtalainen*	53.6	50.1	51.8
Abundant — *Runsas*	77.4	59.2	68.3
	Ratio — *Suhteet*		
Removed — *Poistettu*	73	95	84
Moderate — *Kohtalainen*	100	100	100
Abundant — *Runsas*	144	118	132

43. Work strain

Time study may give a one-sided picture of the effect of slash in manual plating. It was therefore sought to improve the reliability of the results through physiologic observations. Work strain was measured on the basis of the ECG-phenomenon by following the pulse rate.

The pulse rate rises when the work load on the muscles increases. There is a close positive correlation between oxygen consumption and the pulse rate (Fig. 12). Fig. 13 shows that distinct differences exist in the strain of individual phases of work. The pulse rate curve assumes an even wavelike movement during actual planting work; its peaks coincide with preparing the hole for each seedling (cf. Callin and Hansson 1959).

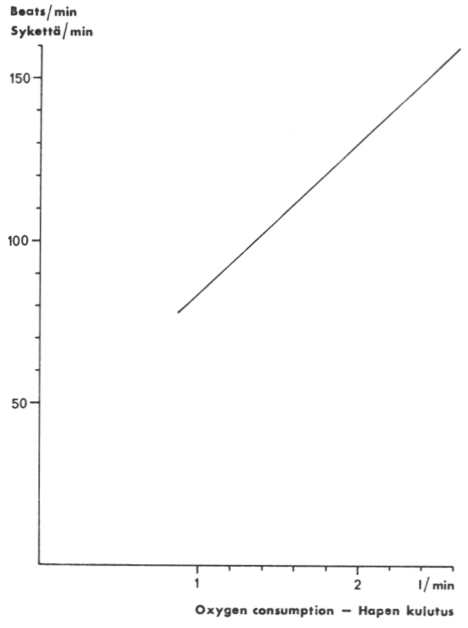


Figure 12. An example of the correlation between oxygen consumption and pulse rate in planting work.
(Callin and Hansson 1959).
Kuva 12. Esimerkki pulssin ja hapenkulutuksen välisestä korrelaatiosta istutustyössä.
(Callin *ja* Hansson *1959*).

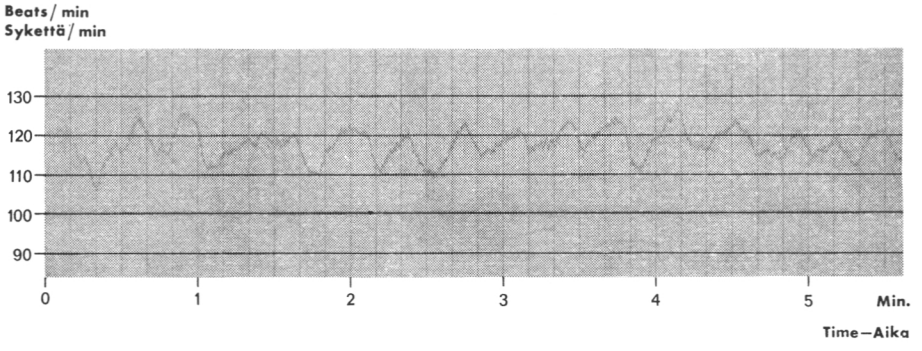


Figure 13. An example of the variation in pulse rate of worker II during actual planting work in slash-free conditions.
Kuva 13. Esimerkki istuttajan n:o II pulssin vaihtelusta varsinaisessa istutustyössä hakkuutähteettömällä koeruudulla.

In addition to physical strain, psychic factors affect the pulse rate. The tension caused by the study alone at first quickens the pulse rate of a worker who is not accustomed to measurements. The results of the first day were therefore omitted from the final material which comprised 18 experimental plots.

Slash interferes with the planning of the work, the movements of the worker and other activity. It would therefore seem natural that slash removal reduces the physical and psychic strain of planting. This indeed happens if the output of the planting work is kept constant. As was shown earlier, however, output increases essentially and the structure of the work time changes accordingly. The most important point with strain is that the heaviest phase of the work takes a relatively higher proportion of the time to complete than it did earlier. When slash was removed the share of the hoeing of the hole in total productive time grew for worker I from 36 to 45 % and for worker II from 27 to 39 %. Slash removal thus leads in this case to expanded output and a change in the structure of the work as a result of which the strain on the worker is not diminished in practice despite the easier working conditions.

The average pulse rate in actual planting work was 106.7 beats per minute for worker I and 115.7 for worker II. According to the general classification system, this corresponds to medium heavy work (101—125 beats/minute) (cf. Christensen 1964). The difference between the workers corresponded to the resting pulse rates, 42 and 55 beats per minute.

The variation in pulse rate was caused most clearly by the worker and the proportion of time needed for hoeing the planting hole. These two factors explain 49 % of the plot-to-plot variation.

$$y = 70.6 + 14.9x_1 + 0.884x_2 \qquad R = 0.6974$$

y = Pulse rate in actual planting, beats/min.
x_1 = Worker (1 or 0)
x_2 = Proportion of time used for hoeing the hole, % of total time in actual planting.

The effect of slash removal on the average pulse rate of workers I and II in actual planting work can be calculated from the formula. It is only necessary to take into consideration the change in the composition of the working time when slash is removed from the reforestation area.

	Worker I *Istuttaja I*	Worker II *Istuttaja II*
	Pulse rate, beats/min. *Pulssi, sykettä/min.*	
Slash left — *Tähteet jäljellä*	103.4	109.6
Slash removed — *Tähteet poistettu*	109.9	120.2

The total productive work time per seedling varied greatly between the experimental plots. This variation was not, however, correlated with the pulse rate. Nor did the hoeing time per seedling explain the variation in pulse rate. The temperature was fairly stable during the experiment and did not seem to affect the pulse rate. The pulse rate was not affected significantly in a Swedish

planting study by a temperature difference of over 10 degrees (Callin and Hansson 1959).

To summarise, the pulse rate studies suggest that although the removal of slash eases the planting work and increases output appreciably, it does not in practice make the work any lighter, at least not in the light of pulse rate measurements. However, it should be noted that pulse rate does not reveal the changing of all the factors that contribute to the work load. When slash is abundant the worker may have to work at times in an uncomfortable position. The changes in psychic strain are only partly manifested in the variation of the pulse rate.

In spite of the lower pulse rate, the need for rest breaks was greatest when slash was abundant. Removal of slash reduced the share of resting time in total work time from 15 to 14 % for worker I and from 20 to 12 % for worker II. The worker does not experience the changing work load in the manner shown by pulse rate studies. He finds the work more pleasant in an area where slash has been removed.

44. Output

Work output is expressed here as the number of seedlings per actual working hour. Interruptions were taken into consideration. The share of interruptions was 18 % in areas where slash had not been removed. When it was removed the proportion decreased to 13 %. Fetching the seedling was calculated to take 10 % of the working time, which is actually more than was measured in the present study. In addition, 2 % of the work time was allowed for tool maintenance and comparable jobs.

The share of actual planting in the output calculations was 70 % of the total working time if slash was not removed. Inspite of the higher pulse rate the worker finds the work more pleasant after slash removal, rest intervals are shortened and the share of actual planting work rises to 75 % of the total work time. The following calculation is arrived at on the basis of the data given in Table 5.

	Amount of slash — *Tähteitten määrä*		
	Abundant *Runsas*	Moderate *Kohtalainen*	Removed *Poistettu*
Productive time, cmin/seedling — *Tehotyöaika, cmin/taimi*	68.3	51.8	43.5
Proportion of actual planting time, % — *Varsinaisen istutustyön osuus*, %	70	70	75
Output, seedlings/work hour — *Tuotos, tainta/työtunti*	36.9	48.6	62.1
Relative output — *Suhteellinen tuotos*	76	100	128

When the amount of slash was moderate (about 100 solid cu.m. of bole wood per hectare) the output was 49 seedlings per actual working hour. However, as there were only two workers and a total of 20 working days in the research

material the absolute output values for the different plots cannot be generalised. The results may, however, be used for purposes of comparison.

When the quantity of slash was moderate its total removal raised the planting work output by 28 %. If slash was very abundant, its removal raised the output by as much as 68 %.

Tree methods do not, however, yield such favourable results in practice for some slash is always left on the logging site. In whole-tree skidding only half the slash is removed from the forest (cf. Rheborg 1972). Under winter conditions the figure may be even lower (Gunnarfelt 1973). It may be assumed, correspondingly, that output in manual planting increases by perhaps 10—20 % in an average clear-cutting area in South Finland when the tree methods are used. If the amount of timber is over 200 solid cu.m. per hectare, a quantity of slash that corresponds to 100 cu.m. of stemwood remains in the forest even when whole tree skidding is employed and the outcome is an increase of 25—35 % in output.

5. SUMMARY

An essential part of the joint Nordic research programme for the utilization of logging residues is evaluation of the consequential effects of harvesting branches, stumps and roots. Facilitation of reforestation work is one of them. The target of the present study was to examine the effect of slash removal on the structure of the work time, time consumption in individual work phases, output and work strain in manual planting.

The investigation was conducted in Central Finland from September 21 to October 6, 1972, under statisfactory weather conditions (Table 1). The area had been clear cut in the preceding winter. The quantity of slash was classified as partly abundant, partly moderate. The seedlings were 2/2 year old Norway spruce, and the spacing was 2 × 2 m.

The area was divided into 1/4 hectare plots, 20 in total (Table 2). Slash was removed carefully from 10 randomly selected plots. The remaining 10 plots were left as they were (Figs. 1—4). The number of seedlings planted in each case was as many as a worker could place in one day in his plot.

Planting was done with the semicircular hoe of Fiskars (Fig. 5). The seedlings were carried in a plastic basket (Fig. 6). Piece rate wages were adopted.

Two workers participated in the work study. One planted 9 and the other 11 plots. Both men were accustomed to planting work and did it very carefully.

Time studies were conducted by the random-sample or frequency method. The interval between observations was 50 cmin. The sound signals were given from a portable tape recorder.

Work strain was studied by following the pulse rate of the heart. An automatic remote measurement apparatus for continuous recording of the pulse rate of the worker was used (Fig. 7). The apparatus was built at the Finnish Forest Research Institute.

An average of 78 % of the working time was spent on actual planting. The share of resting time averaged 15 %. When slash was removed the need for rest intervals appeared to decrease and the share of actual planting time grew (Table 3).

Actual planting work time was distributed as follows in plots where slash had not been removed: moving 17, slash removal 13, hoeing the hole 32 and placing

the seedling in the soil 38 % (cf. Figs. 8—11). After slash removal the work time distribution was: moving 18, hoeing the hole 42 and placing the seedling in the soil 40 % (Table 4). The share of hoeing, the heaviest job, was thus greatest in slash-free plots.

Slash removal speeded up moving from seedling to seedling. Placing the seedling in the soil also became easier and the clearing of branches from the planting site was omitted. If slash was abundant (corresponding to harvesting of 200—250 solid cu.m. per hectare), an average of 68 cmin was needed to plant a seedling. If the amount of slash was only moderate (corresponding to harvesting of about 100 solid cu.m. per hectare) the planting time was 52 cmin/seedling. When slash was removed completely the time diminished to 44 cmin/seedling (Table 5).

If the output of planting work in moderate slash conditions is denoted by 100, the output in abundant slash conditions was 76. Slash removal raised the output to 128. The differences in the duration of the rest breaks were taken into consideration here.

The expanded output due to slash removal and the changing structure of the work time (Fig. 13) were accompanied by a slight rise in pulse rate in actual planting work, for worker I from 103 to 110 and for worker II from 110 to 120. The shortening of the rest intervals and the interview statements showed, however, that the workers did not consider work in slash-free plots to be more strenuous.

LITERATURE

Appelroth, S.-E. 1969. Tutkimus metsänistutuskoneista m/TTS, Ylö ja Holkki. Summary: A study of tree planting machines m/TTS, Ylö and Holkki. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 68.5.

—„— 1972. Ennakkotietoja metsänistutuksen palkkaperustetutkimuksesta. Stenciled copy.

Appelroth, S.-E. ja Harstela, Pertti. 1970. Tutkimuksia metsänviljelytyöstä I. Kourukuokka, kenttälapio, taimivakka, taimilaukku sekä istutuskoneet Heger ja LMD-1 istutettaessa kuusta peltoon. Summary: Studies on afforestation work I. The use of the semi-circular hoe, the field spade, plant basket, plant bag and the Heger and LMD-1 tree planters in planting spruce in fields. Folia Forestalia 85.

Bärring, Ulf. 1967. Studier av metoder för plantering av gran och tall på åkermark i södra och mellersta Sverige. Summary: Studies of methods employed in the planting of Picea abies (L.) H. Karst. and Pinus silvestris L. on farm land in Southern and Central Sweden. Studia Forestalia Suecica Nr 50.

Callin, Georg och Hansson, Jan-Erik. 1959. Plantering av tall och gran. En jämförande arbetsstudie av manuella metoder. Summary: Planting of pine and spruce. Comparing studies of manual methods. Meddelanden från Statens Skogsforskningstitut. Band 48, Nr 8.

Christensen, E. H. 1964. L'homme an travail, serie sécurité, hygiene et medicine du travail no. 4. Bureau International du travail. Génève.

Gunnarfelt, Björn. 1973. Kvistkvantiteter vid helträdslunning vintertid. Skogshögskolan. Institutionen för skogsteknink. Manuscript.

Hakkila, Pentti. 1971. Coniferous branches as a raw material source. Lyhennelmä: Havupuun oksat raaka-ainelähteenä. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 75.1.

Harstela, Pertti. 1969. Metsätöiden aikatutkimuksia täydentäviä huomioita. Yritystalous n:o 12.

—„— 1970. Kasausajan ja valtimonlyöntitiheyden sekä tehollisen sahausajan määrittäminen järjestettyjen kokeiden, pulssitutkimuksen ja frekvenssianalyysin avulla. Summary: Determination of pulse repetation frequency and effective sawing time with set tests, pulse study and frequency analysis. Folia Forestalia 80.

Herranen, Tarmo. 1969. Työvaikeustekijöiden selvitys kuusen taimien istutuksessa. Metsähallitus, kehittämisjaosto. Moniste.

Mälkönen, Eino. 1972. Hakkuutähteiden talteen oton vaikutus männikön ravinnevaroihin. Summary: Effect of harvesting of logging residues on the nutrient status of Scotch pine stands. Folia Forestalia 157.

Nisula, Pentti. Aikakello- ja pistokoemenetelmän vertailu. Summary: A comparison between the stop-watch method and the random-sample method. Silva Fennica.

Savolainen, Raimo. 1972. Puunkorjuumenetelmät ja korjuutekniset olosuhteet hankintavuonna 1971/72. Summary: Methods and technical conditions of harvesting in the logging year 1971/72. Metsätehon katsaus 17/1972.

Rheborg, Hans. 1972. Kvistkvantiteter vid helträdslunning. Skogshögskolan. Inst. för skogsteknik. Rapporter och uppsatser Nr 48.

Viro, P.J. 1958. Suomen metsämaiden kivisyydestä. Summary: Stoniness of forest soil in Finland. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 49.4.

HAKKUUTÄHTEIDEN VAIKUTUS KÄSINISTUTUKSEN TYÖVAIKEUTEEN

Lyhennelmä

NSR:n (Nordiska Skogsarbetsstudiernas Råd) alaiseen yhteispohjoismaiseen hakuutähteitten hyväksikäyttöön tähtäävään tutkimusohjelmaan kuuluu myös oksien, kantojen ja juurien korjuun aiheuttamien seurannaisvaikutusten selvittäminen. Eräs niistä on metsänviljelyttöitten helpottuminen. Käsillä olevan tutkimuksen tavoitteena on selvitellä oksien ja runkohukkapuun poistamisen vaikutusta käsinistutuksen työajan rakenteeseen, sen eri työvaiheitten ajanmenekkiin, tuotantoon ja työn rasittavuuteen.

Tutkimus suoritettiin Metsäntutkimuslaitoksen Vilppulan kokeilualueessa 21. 9. —6. 10. 1972 istutustyön kannalta tyydyttävissä sääoloissa (taulukko 1). Uudistusalue oli edellisenä talvena aukeaksi hakattu MT-kangas. Tähteitten määrä oli paikoitellen hyvin runsas (runkopuuta korjattu yli 200 k-m^3/ha), paikoitellen kohtalainen (runkopuuta noin 100 k-m^3/ha). Alueelle istutettiin 2/2-vuotiaita kuusentaimia 2 × 2 metrin välein.

Tutkimusalue jaettiin kaikkiaan 20 neljänneshehtaarin ruutuun (taulukko 2). Kymmeneltä arpoen valitulta ruudulta tähteet poistettiin huolellisesti, ja muut kymmenen jätettiin ennalleen (kuvat 1—4). Kukin koeruutu sisälsi niin monta tainta kuin työntekijä yhden työpäivän kuluessa asianomaisissa oloissa kykeni istuttamaan.

Työvälineinä käytettiin Fiskarsin uudenmallista kourukuokkaa ja taimien kantamiseen muovikoria (kuvat 5 ja 6). Työssä noudatettiin urakkapalkkoja.

Tutkimukseen osallistui kaksi työntekijää, jotka kummatkin olivat tottuneita istuttajia ja suorittivat työnsä huolellisesti. Toinen istutti 11 ja toinen 9 koeruutua.

Aikatutkimuksissa sovellettiin frekvenssimenetelmää. Havaintovälin pituus oli 50 cmin. Äänimerkit annettiin aikatutkijain mukaan kantamilta nauhureilta.

Työn rasittavuutta tutkittiin syketaajuuden perusteella. Työntekijän sydämen sykkeen muutoksia seurattiin Metsäntutkimuslaitoksen metsäteknologian tutkimusosastolla kehitetyllä automaattisella kaukomittauslaitteistolla (kuva 7).

Keskimäärin 78 % työmaa-ajasta käytettiin varsinaiseen istuttamiseen. Levon osuus oli 15 %. Kun tähteet poistettiin, lepotaukojen tarve näytti pienenevän ja tehollisen työajan osuus kasvoi (taulukko 3).

Koeruuduilla, joilla tähteet olivat jäljellä, varsinainen istutustyöaika jakaantui seuraavasti: siirtyminen 17, tähteitten poistaminen 13, istutuskuopan teko 32 ja taimen maahan pano 38 %. Tähteitten poistamisen jälkeen työajan jakaantuma muuttui seuraavaksi: siirtyminen 18, kuopan teko 42 ja taimen maahan pano 40 % (taulukko 4). Puhdistetuilla ruuduilla raskaimman työvaiheen, kuokkimisen, osuus oli siis suurin.

Tähteitten poistamisen ansiosta siirtyminen taimelta toiselle nopeutui. Myös taimen maahan asettaminen helpottui, ja oksien raivaaminen istutuskohdalta jäi pois kokonaan. Ajan säästö oli luonnollisesti sitä suurempi, mitä enemmän alueella oli hakuutähteitä. Jos tähteitä oli runsaasti (vastaten 200—250 k-m^3:n hakkuukertymää hehtaaria kohti), tarvittiin keskimäärin 68 cmin taimen istuttamiseen. Jos määrä oli vain kohtalainen (vastaten n. 100 k-m^3:n hakkuukertymää hehtaarilta), oli istutusaika 52 cmin tainta kohti. Kun tähteet poistettiin kokonaan, aika supistui 44 cmin:iin (taulukko 5).

Kun istutustyön tuotosta merkittiin tähdemäärältään keskinkertaisessa tapauksessa luvulla 100, oli tuotos runsaasti tähteitä sisältävällä uudistusalalla vastaavasti 76. Tähteitten poistaminen nosti tuotoksen suhdelukuun 128. Tällöin on otettu huomioon myös erot lepotaukojen pituudessa.

Suurentuneeseen tuotokseen ja työajan rakenteen muuttumiseen liittyy sykkeen taajentuminen varsinaisessa istutustyössä. Kun syketaajuus oli tähteitten peittämällä alueella työntekijällä I 103 ja työntekijälle II 110 kertaa minuutissa, olivat vastaavat luvut tähteistä puhdistetuilla koeruuduilla 110 ja 120. Mitä suurempi oli kuopantekovaiheen osuus, sitä taajemmaksi kohosi työntekijän syke varsinaisessa istutustyössä (kuva 13). Lepotaukojen lyheneminen ja haastattelulausunnot kuitenkin osoittivat, että työntekijät eivät edellisestä huolimatta kokeneet työskentelyä tähteettömillä ruuduilla rasittavammaksi.

THE EFFECT OF TOPOGRAPHY ON THE VOLUME OF FOREST GROWING STOCK

SIMO POSO AND MATTI KUJALA

SELOSTE:
TOPOGRAFIAN VAIKUTUS PUUSTON KUUTIOMÄÄRÄÄN

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0060-9

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

PREFACE

This paper is a byproduct of a larger project: the national forest inventory of Inari, Utsjoki and Enontekiö in 1970. The study was made in close co-operation with these authors. Computer calculations were made by Matti Kujala and Simo Poso is responsible for writing.

Helsinki, November 1972

Simo Poso *Matti Kujala*

CONTENT

Page

1. Initiative and the objectives 5
2. Climatological frame 6
3. Basic material 9
4. Calculations 13
5. Results 17
   51. Effect of the ground elevation on growing stock 17
   52. Effect of land form on growing stock 17
   53. Effect of slope direction on growing stock 21
6. Discussion 24
   61. Confidence of results 24
   62. Findings and conclusions 25
7. Summary 27

References 28

Suomenkielinen seloste 29

1. INITIATIVE AND OBJECTIVES

The fifth national forest inventory was performed in the northernmost part of Finnish Lapland in 1970, by means of a sampling method based on photo interpretation and field measurements (*Poso* and *Kujala* 1971). A large number of sample units (15 441) was studied from photographs and supplied with certain topographic information such as ground elevation, land form, and direction of slope.

The material of the inventory offered a good possibility for studying the relationship between topographical characteristics and volume of forest growing stock. The material was from an area where heavy cuttings rarely took place and virgin forests prevailed. In such conditions there probably exists a strong correlation between volume of growing stock and forest growth potential. Thus, the broader objective of this study was to obtain information concerning changes of growing potential in relation to topographical features.

2. CLIMATOLOGICAL FRAME

The study area is located between the latitudes of 68° and 70° N, and represents arctic forests. The extreme conditions of growth, however, may be of some positive nature from the point of view of this study. The area is influenced by a transitional climate. Because of the vicinity of the Arctic Ocean, springs and autumns are milder and summers cooler than in the more continental parts of the same latitudes. The effect of the Arctic Ocean is increased by winds which rather frequently come from the north in the summer time (cf. *Angervo* 1962, pp. 79—80 and the *Finnish Meteorological Institute* 1971, p. 43). The unfavorable effect of the ocean is most obvious in the northernmost part of the study area, and almost down to Lake Inari.

Tree growth, like growth of other plants, depends on the soil quality and on climatological factors such as light energy, temperature, moisture, and winds. The unfaorable effect of strong winds is especially noticeable on the tops of arctic mountains (fjelds).

The precipitation in Lapland is the lowest in Finland with only some 400 mm per year. However, due to the relatively low temperature the climate of Lapland is humid, and the lack of moisture is not a restricting factor for tree growth. According to *Oinonen*, *Sarvas* and *Sirén* (1966) the most humid climate in Finland is found in Lapland where the soil is moist or even wet over a long period of the growing season.

Because of the arctic location of the study area, the most important limiting factor for tree growth there is undoubtedly the temperature. *Oinonen*, *Sarvas* and *Sirén* (1966, p. 4) state that the quality of the site for tree growth in northern Lapland is dominated by the temperature, whereas physical and chemical soil characteristics are of minor importance. Because of its significance, the temperature will be studied here in more detail.

According to the statistical data for the years 1931 to 1960, published by *Kolkki* (1966), the annual mean temperature of the study area lies between —2 and 0° C. The mean temperature of the warmest month (July) averages from 11° to 15° C and that of the coldest month (February) from —13° to —12° C. The length of the growing season (no. of days per year with mean temperature over 5° C) and the sum of effective temperatures, ($\Sigma\,(t_i$—5° C) where t_i = the mean temperature of a day and where negative values are

omitted), in some points of the study area and in Helsinki are (*Kolkki* 1966, pp. 4 and 23):

Station	Elevation	Length of growing season	Effective sum of temperatures
Ivalo airport	140 m	124 days	702 units
Enontekiö, Kilpisjärvi	507 »	100 »	389 »
Inari, Toivoniemi	149 »	123 »	699 »
Utsjoki, Nuorgam	27 »	111 »	511 »
Helsinki, Ilmala	45 »	174 »	1 324 »

It is generally known that the temperature decreases as land elevation increases. According to measurements in Kiilopää, close to the southern borderline of the study area, the change of temperature (gradient) was —0.65 to —0.70° C/100 metres during summer (*Huovila* 1971, p. 64). The results were based on observations made at elevations of 326, 407, 488, and 546 metres.

In Norway, the thermal summer gradient is generally assumed to be —0.7° C/100 m (*Mork* 1968). Under Norwegian fjeld conditions, in warm summers the value of the gradient is smaller than in cool ones (*Mork* 1968, p. 484). According to *Geiger* (1957, p. 251) the gradient of maximum day temperatures is —0.87 to —0.96° C/100 m on the mountain of Arber (1447 m) in Bavaria, Germany. The gradient of night temperatures is smaller as can be concluded, for example, from measurements in Kiilopää (*Huovila* 1971, p. 65).

Land form (plain, valley, slope, top) and temperature are clearly intercorrelated. The cold air which is coming down at night often lowers the night temperatures more in valleys than on slopes (cf. *Geiger* 1957, p. 251). *Mork* (1968, p. 487) states that the growing conditions for trees can be better at an elevation of 900 metres than 100 metres lower. According to statistical data from Kiilopää and Kevo (stations in northern Lapland), the thermal conditions are only a little more extreme in valleys than on mountain tops. Valley temperatures do not sink below those of the tops, even at night. Minimum temperatures occur at about 3 a.m. in the valleys and one hour later on hill tops (cf. *Huovila* 1971, p. 65).

The solar radiation hits the flat ground surface at a relatively small angle in the study area. The largest angle (in June) is only about 45°. For this reason the soil and air close to it warm up slower than, for example, in southern Finland. According to observations made in Kevo and Kiilopää, the maximum daily air temperatures occur at 4 p.m., both in the valleys and on hill tops (*Huovila* 1971, p. 65). The highest temperatures of the soil at a depth of one centimetre (0.4 inches) probably occur one or two hours later, or at about 5 or 6 p.m.

The slope of the ground surface naturally causes a change in the maximum angle of solar radiation, increasing it on south slopes and decreasing it on north slopes. *Mork* (1968, p. 521) made comparisons of soil temperatures at a depth of 1 cm, during one day, on southwestern and northeastern slopes of a mountain in southern Norway. The maximum temperatures were measured at 2 p.m. on both slopes. At that time the southwestern slope was 7° warmer. The thermal conditions were also much more extreme there; minimum soil temperatires at night were 3° lower on the southwestern than on the northeastern slope. The daily mean soil temperatures were 16.8° C on the southwestern slope and 16.0° C on the northeastern. All observations were made at the same elevation.

3. BASIC MATERIAL

The material used in this study was originally collected for the fifth forest inventory of Finland. The area extended over about 2.8 million hectares, including three communes: Inari, Utsjoki and Enontekiö. The inventory was made using photo interpretation as a first phase of the sampling, and field measurements as a second one (see *Poso* and *Kujala* 1971). According to the inventory the total volume of forest growing stock in the study area consists of 80 % pine, 3 % spruce and 17 % birch. Some parts are almost treeless due to climatological conditions (Fig. 1).

The sampling unit was a cluster of two relascope plots, 40 m apart, in each of which one tallied tree corresponded to a basal area of one square metre at breast height. The number of such clusters totalled 15 441. They were located on 167 aerial photographs of scale 1 : 60 000. The distribution

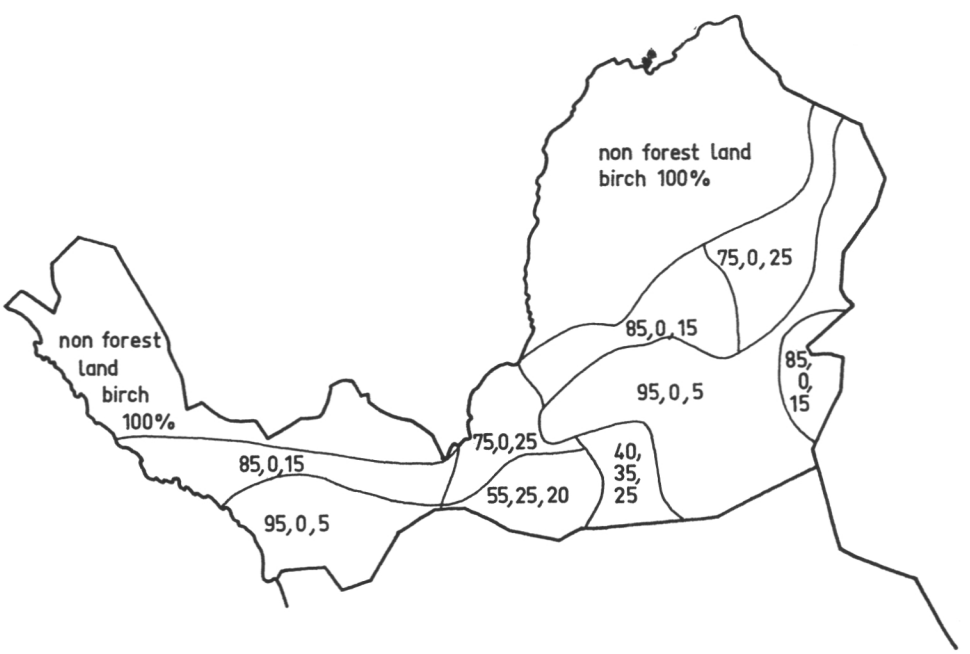


Fig. 1. Proportions of tree species on forested land, %: pine, spruce, birch.
Kuva 1. Puulajien osuudet metsämaalla, %: mäntyä, kuusta, koivua.

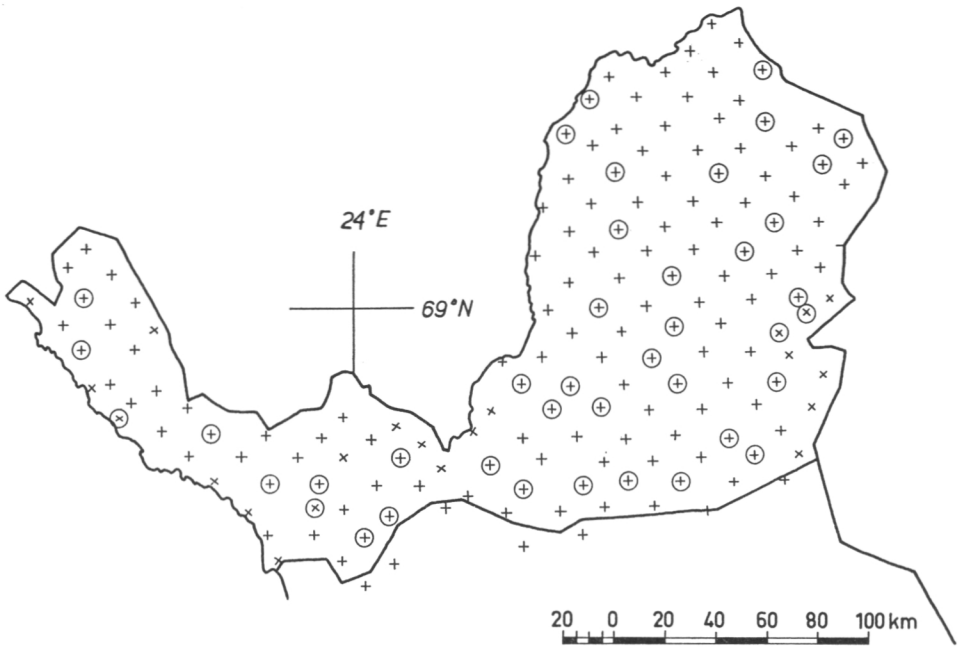


Fig. 2. Location of aerial photographs in the study area.
Kuva 2. Ilmakuvien sijainti tutkimusalueella.

of the photos on the area is shown in Fig. 2. The crosses in the Figure refer to the principal points of the photographs. Some of the clusters on the photos marked by circled crosses, were measured in the field.

One hundred clusters were located on each of the photos of Figure 2, according to the pattern shown in Fig. 3. All 15 441 clusters falling in the study area were interpreted from stereoscopic pairs using lens stereoscopes with magnification 2.8, field-measured stereograms from the Laanila districts, forest maps with complementary stand description records for the areas managed by the National Board of Forestry, and topographic maps. Among the characteristics interpreted were land form, slope direction of the ground surface, land use class, volume of growing stock, tree species composition, and site characteristics.

The ground elevation at the site of the clusters was obtained from contour lines of topographic maps. Both land form and direction of the slope were interpreted from photographs. Eight directions were used to classify the slope; these were the main and intermediate directions. The ninth alternative was a flat terrain, in which case the direction was coded zero. The definition of land forms is included in Figure 4.

In the photo interpretation of characteristics such as land use class, tree volume, and tree species composition, we must be prepared to encounter

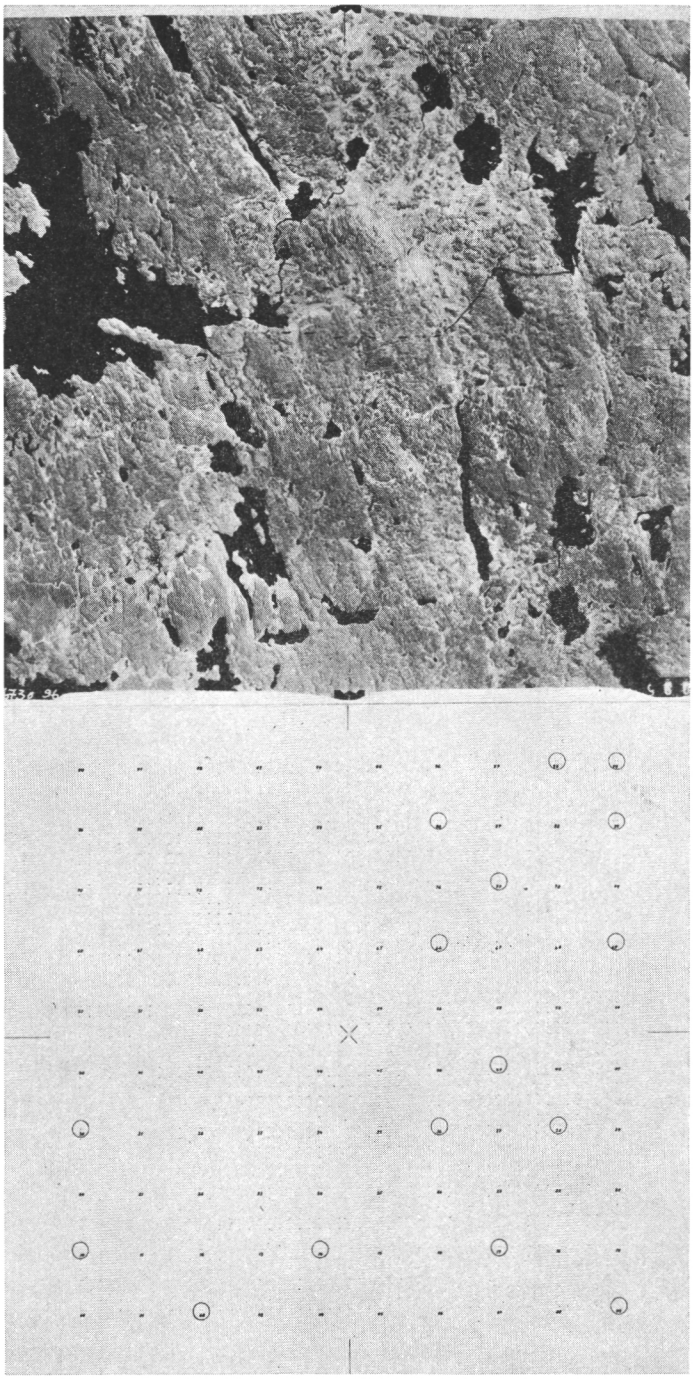


Fig. 3. Aerial photograph and scheme of photo sample units. Circled clusters were measured in the field.

Kuva 3. Ilmakuva ja rypäiden paikallistamiseen käytetty kaavio. Ympäröidyt rypäät on mitattu maastossa.

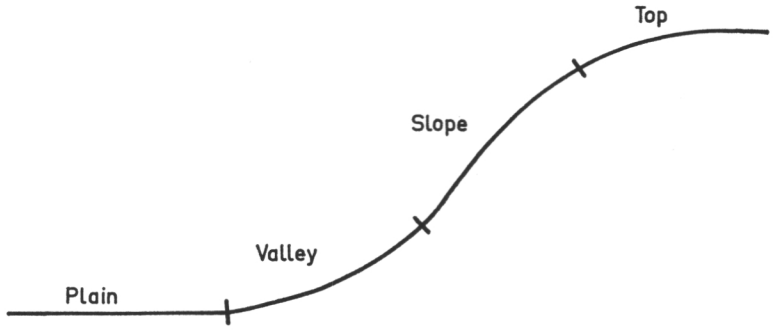


Fig. 4. Definition of land forms.
Kuva 4. Maaston muotojen määrittely.

substantial random and systematic errors. The negative effect of random errors on final results can, however, be greatly reduced by increasing the number of photo sample plots. Field measurements are regarded as necessary in order to eliminate, or at least reduce, the effect of systematic errors.

The clusters which were to be measured in the field were drawn by restricted random sampling (cf. Fig. 2). Their total number was 659. The regression of field volume on photo volume and main tree species was calculated on the basis of those 659 clusters. This regression was used to correct systematic errors in photo volumes.

Separate regression equations were applied to each of the two interpreters, to correct the volumes estimated from aerial photographs. The growing stock volumes on waste land were regarded as zero. Thus the equations were only applied to clusters that fell in the class of forest or poorly productive forest land. Regressions were also calculated for various directions of slopes. Only the common equations were used, however, since there were no significant differences between different directions.

The photo interpretation and the selection of field clusters were done by subareas, the number of which was at first 26. They were intended to be as uniform as possible with respect to their geography and forest character. In this study the number of subareas (called area from now on) was reduced to half, or thus to 13 (cf. Fig. 6, p. 18). For final calculations, each photo-interpreted cluster was supplied with the following data units:

— area to which the cluster belongs (1—13)
— land use class (1—7)
— elevation above sea level, in metres
— land form (1—4)
— direction of land slope (0, 1—8)
— regression estimate of tree volume, m^3/ha.

4. CALCULATIONS

For reasons of feasibility the calculations were restricted to clusters which a) were labeled as mineral soil and forest, poorly productive forest land or waste land and b) were located in the forested zones of the 13 areas. The first restriction eliminated swamps, agricultural land, waters, roads, power lines, etc. and thereby reduced the number of clusters to 10 816, or to 70 % of the original total. The second restriction further decreased the number of clusters to 9 175 or to 60 %, by eliminating those situated above the maximum elevation line for poorly productive forest land.

Differences in land forms

Comparisons between the growing stock of different land forms were based on the differences between combinations of two land forms by elevation zones of 40 metres and by area. The differences by zones were pooled to result in differences by areas, and finally by groups of areas. The weights used in pooling were inverses of the variances of differences, thus representing the confidence of the zonewise differences. The mathematical description of the procedures is given in the following. The mean volume of growing stock of an elevation zone in an area is

$$\bar{y}_{ikh} = \sum_{l} y_{ikhl}/n_{ikh}$$

where

n = number of observations
i = subscript for land form
k = » » area
h = » » elevation zone
l = » » single cluster

The difference between two land forms of an elevation zone in an area is

$$d_{ijkh} = \bar{y}_{ikh} - \bar{y}_{jkh}$$

where i and j are subscripts representing the two land forms ($i \neq j$).

Because there were four separate land forms, the number of combinations compared was six. The difference of two land forms for an area is

$$d_{ijk} = \sum_{h} w_{ijkh}\, d_{ijkh} / \sum_{h} w_{ijkh}$$

where

$$w_{ijkh} = n_{ikh}\, n_{jkh} / (n_{ikh} + n_{jkh})$$

The weight w_{ijkh} represents the confidence of the difference $\bar{y}_{ikh} - \bar{y}_{jkh}$ and it has been based on the equation for the variance of the difference of two means

$$s^2_{d_{ij}} = s^2_y \left[(n_i + n_j) / n_i n_j \right]$$

The difference of two land forms, i and j, for a group of g areas is

$$d_{ijg} = \sum_{kg} w_{ijk}\, d_{ijk} / \sum_{kg} w_{ijk}$$

where

$$w_{ijk} = n_{ik}\, n_{jk} / (n_{ik} + n_{jk})$$

After all the differences of the combinations of land forms were calculated, a matrix was obtained. The following example illustrates the weights and differences of a group of areas 3—10.

i	w_{ijg} j			d_{ijg} j		
	valley	slope	top	valley	slope	top
plain	504.2	663.7	172.1	+1.96	—3.98	+1.81
valley		609.5	205.3		—5.45	—0.53
slope			331.6			+4.02

The differences, presented in the form of a matrix, were then transformed to a one-dimensional form with respect to one land form. The difference between one land form and another could be estimated from the matrix with respect to three land forms. The pooling for the final difference was applied as before. The following illustration is based on the matrix presented above, and assuming that the differences will be calculated with respect to slope.

differences	weights
$\bar{y}$ (plain) = $\bar{y}$ (slope) —3.98	663.7
» = » +1.96—5.45	504.2 · 609.5 / (504.2+609.5) = 275.9
» = » +1.81—4.02	172.1 · 331.6 / (172.1+331.6) = 113.3

Average $\bar{y}$ (plain) = $\bar{y}$ (slope) — 3.66 m³/ha

differences	weights
$\bar{y}$ (valley) = $\bar{y}$ (slope) —5.45	509.5
» = » —1.96—3.98	504.2 · 663.7 / (504.2+663.7) = 286.5
» = » —0.53—4.02	205.3 · 331.6 / (205.3+331.6) = 126.8

Average $\bar{y}$ (valley) = $\bar{y}$ (slope) — 5.48 m³/ha

$\bar{y}$ (top) = $\bar{y}$ (slope) —4.02	331.6
» = » —1.81—3.98	172.1 · 663.7 / (172.1+663.7) = 136.7
» = » +0.53—5.45	205.3 · 609.5 / (205.3+609.5) = 153.6

Average $\bar{y}$ (top) = $\bar{y}$ (slope) — 4.63 m³/ha

The differences —3.66, —5.48 and —4.63 m³/ha are in concordance with Figure 11, p. 21 (group of areas 3—10).

Differences in slope directions

Comparisons between the growing stock of different slope directions were based on a simpler technique. It became evident that the distribution of the clusters in different elevation zones was much more similar for different

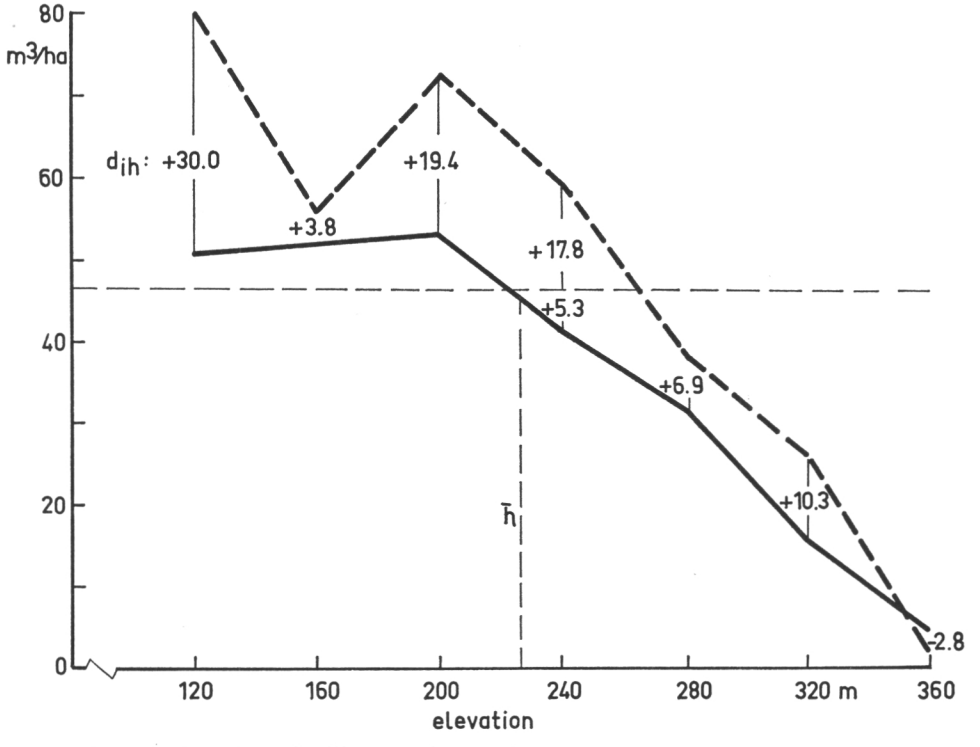


Fig. 5. Calculation of differences in growing stock with directions of slope. Example concerns area 8, direction west.

Kuva 5. Kaltevuussuunnittaisten puustoerojen laskeminen. Esimerkkinä alue 8, suunta länsi.

directions of slope than for different land forms. Because of this, the technique illustrated in Figure 5 was used to calculate the differences in mean volume for eight slope directions.

The Figure shows that the element in calculation is the difference between the mean of the clusters belonging to a certain direction of slope and elevation zone, and the mean of all clusters belonging to the elevation zone, or:

$$d_{ikh} = \bar{y}_{ikh} - \bar{y}_{kh}$$

where

i = subscript for direction of slope
k = subscript for area
h = subscript for elevation zone of 40 metres.

The difference for a direction i and for an area k is

$$d_{ik} = \sum_{h} n_{ikh}\, d_{ikh} / \sum_{h} n_{ikh}$$

where

n_{ikh} = number of clusters

In the example (Fig. 5) $d_{ik} = +12.3$ m³/ha.

The difference of a slope direction from the mean volume of growing stock for a group of areas is

$$d_{ig} = \sum_{k \varepsilon g} n_{ik}\, d_{ik} / \sum_{k \varepsilon g} n_{ik}$$

The procedure of Fig. 5 tends to underestimate the differences. The same procedure was used experimentally to calculate differences by land forms. The results showed only small differences from the results based on a more accurate method (cf. pp. 13—14). This gives reason to conclude that the underestimation in the case of slope directions is not of any significance.

5. RESULTS

51. Effect of ground elevation on growing stock

The mean volumes of the growing stock were calculated by areas for each elevation zone of 40 metres. Figures 6—9 show separate results for all land forms except plains, and common results for the four land forms.

The short cross lines in Fig. 6 represent the mean elevation of the forested zone of each area. The 13 areas are numbered according to the map attached to the Figure.

Figures 6—9 show that the volume of growing stock diminishes rapidly with ground elevation. Within the group of areas 3—10 the decrease amounts to about 31 m^3/ha/100 m of slope (Fig. 8), estimated at the mean elevations of the forested zones. The lines of all the areas 3—10 are very much in harmony. This allows us to regard the gradient 31 m^3/ha/100 m as fairly reliable. This gradient is probably also applicable to plains, although no separate study was made.

The volume gradient is much smaller, only about 9 m^3/ha/100 m, for areas 1, 2 and 11—13. The difference from areas (3—10) may be partly explained by the measuring technique, in combination with low volumes: photo estimates placed these areas in the 10 m^3/ha volume class. Additionally, the depth of an area in the North-South direction tends to decrease the gradient, especially if the area has a low volume. A third explanation involves the tree species. Areas 3—10 consist mainly of pine *(Pinus silvestris)*, areas 1, 2 and 11—13 of birch *(Betula pubescens)*.

52. Effect of land form on growing stock

The mean volumes were first calculated by land form, without paying any attention to elevation. In Fig. 10 the x-axis refers to the mean elevation of the respective land forms. Arithmetic means were calculated for three groups of areas: all 13 areas, areas 3—10, and areas 1, 2, 11—13.

According to Fig. 10 the order of mean volumes is as expected with respect to the mean elevation of the land form, except for the northernmost area group. In the calculations the plain required a special treatment. This land

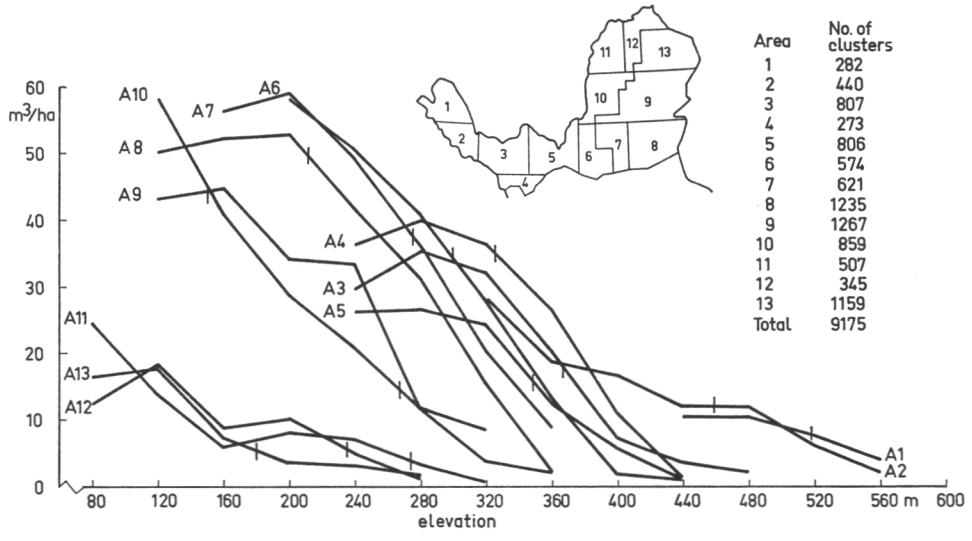


Fig. 6. Mean volumes based on all clusters.
Kuva 6. Koko aineistoa koskevat keskikuutiot.

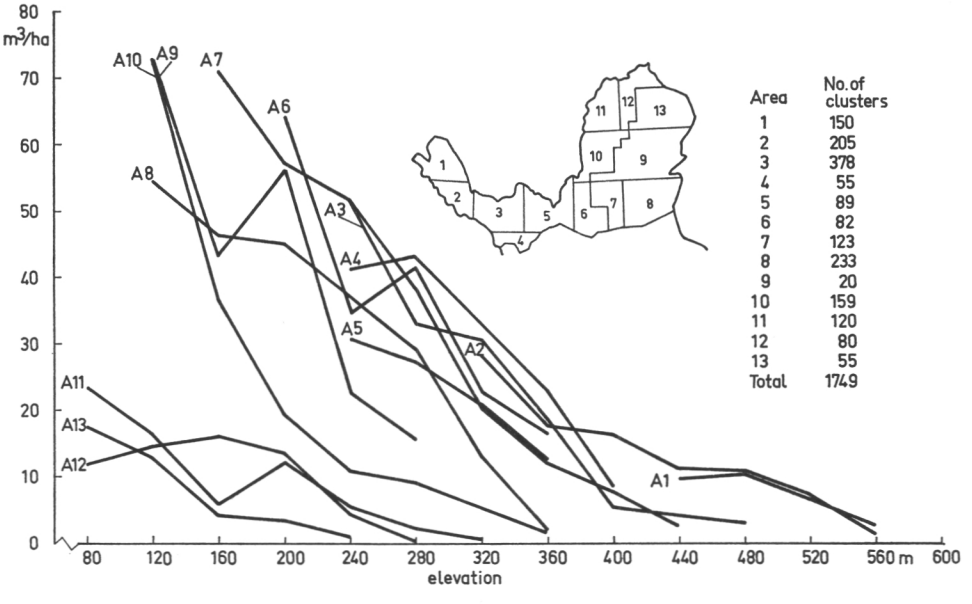


Fig. 7. Mean volumes based on clusters in valleys.
Kuva 7. Laaksoon sattuneiden rypäiden keskikuutiot.

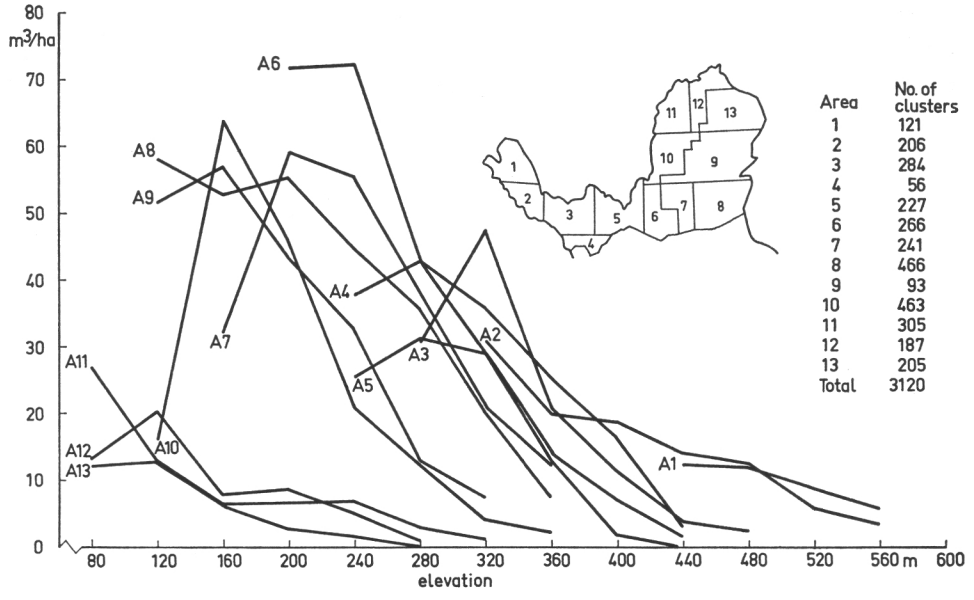


Fig. 8. Mean volumes based on clusters on slopes.
Kuva 8. Rinteille sattuneiden rypäiden keskikuutiot.

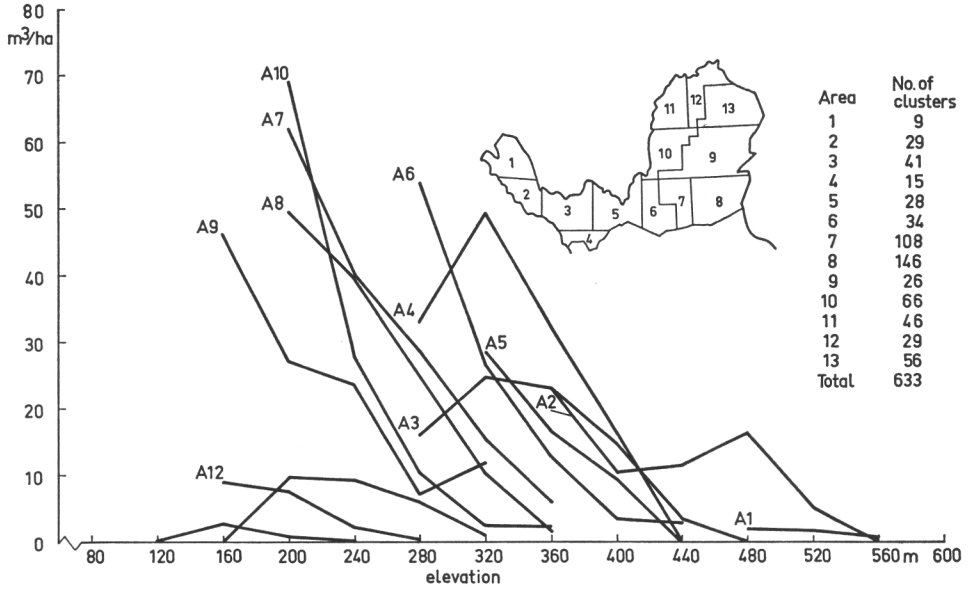


Fig. 9. Mean volumes based on clusters on hill tops.
Kuva 9. Tunturien laelle sattuneiden rypäiden keskikuutiot.

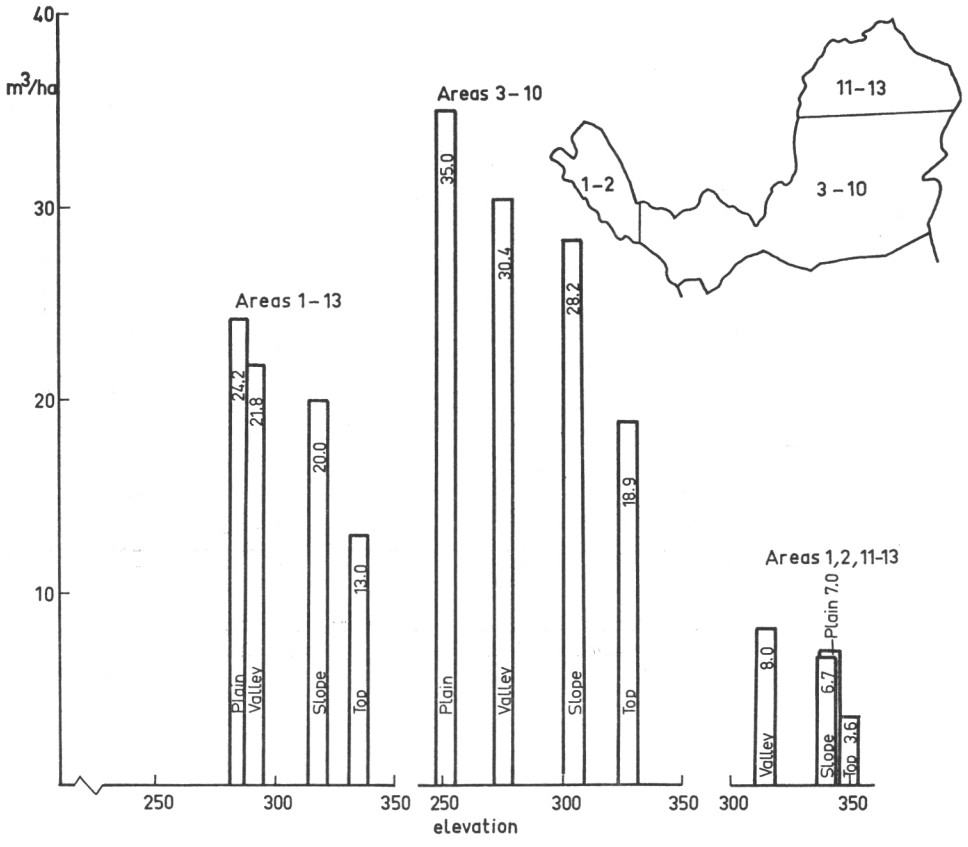


Fig. 10. Mean volumes of growing stock for separate land forms.
Kuva 10. Eri maaston muotojen keskikuutiot.

form did not exist in areas 1 and 2. The means of the plain for these areas were assumed to equal the average of the means of other land forms in the respective areas.

The question arising here is: how good are the separate land forms for tree production, compared to each other? Fig. 10 shows that the relation between mean volume and mean elevation is not linear from one land form to another. In order to study this question, the mean volumes on different land forms were calculated to correspond to the same ground elevations (see Chapter 4). The results are presented in Fig. 11.

The mean volume on a slope at a certain ground elevation is about 15 % higher than that of other land forms, for the group of areas 3—10. Some percentage points of the difference may be explained by the fact that the plot areas were defined in an horizontal plane, and not at ground level. This means that the true ground area of plots falling on slopes is somewhat larger

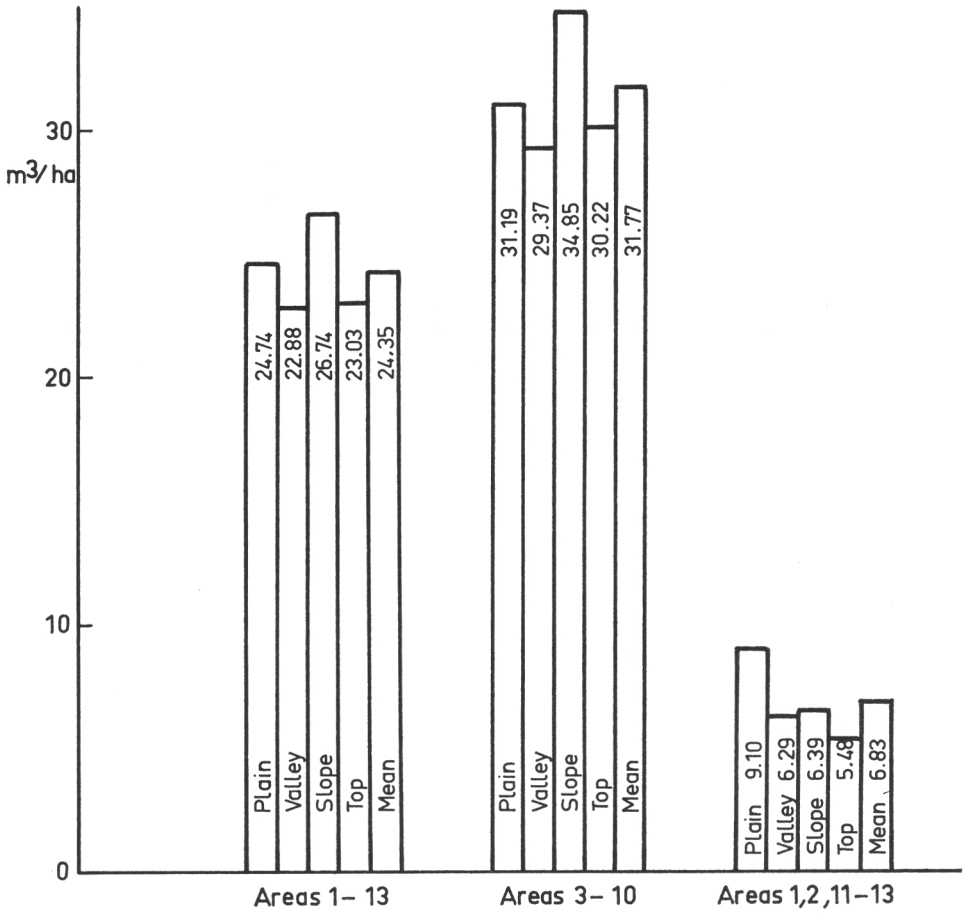


Fig. 11. Mean volumes of growing stock corrected for ground elevation.
Kuva 11. Puuston korkeuskorjatut keskikuutiot.

than that of plots falling on other land forms. The relations of the volumes in areas 1, 2, 11—13 differ greatly from those of areas 3—10. The plain shows higher volumes there, compared to other land forms. However, the significance of these differences cannot be regarded as high, as is the case for areas 3—10.

53. Effect of slope direction on growing stock

The total number of clusters supplied by one of the code sets from 1 to 8, which refer to the slope direction, was 4030. Thus, one direction produced an average of 504 clusters. Fig. 12 illustrates the variation in mean volume between various directions of slope.

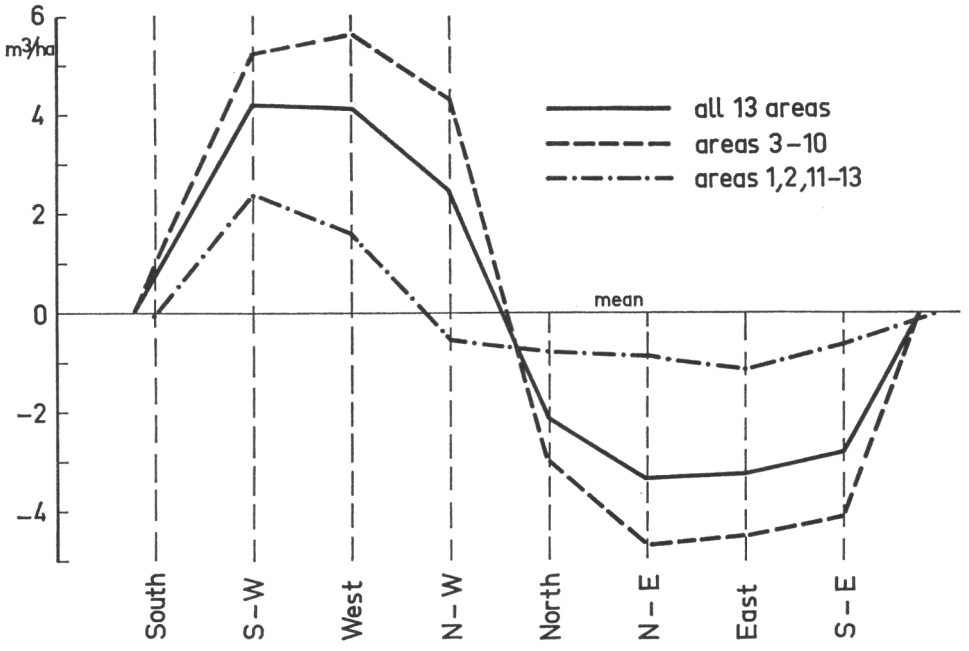


Fig. 12. Fluctuation around the average level of mean volumes for different slope directions.
Kuva 12. Kaltevuussuuntien keskikuutioiden vaihtelu keskitason suhteen.

The highest volumes exist in the west, south-west and north-west directions. South comes fourth. The lowest volume values are on the north-east, east and south-east slopes. Comparison of the values of the two area groups shows some minor discrepancies. These may be explained by the vicinity of the Nordic Ice Sea and the cool summer winds coming from that direction. Since the northernmost areas are birch and tundra zones, the volumes of growing stock and their variations are far smaller there than in the more southern areas. On the other hand, the relative fluctuations are about the same, as seen in Figure 13.

For further illustration, the three west and three east directions were grouped by areas, and the mean volumes were calculated by these groups (Fig. 14).

According to Figure 14, the differences in volume by areas show great consistency, supporting their high statistical significance. The volumes of the western group are about 35 % higher than those of the eastern group, in Fig. 14.

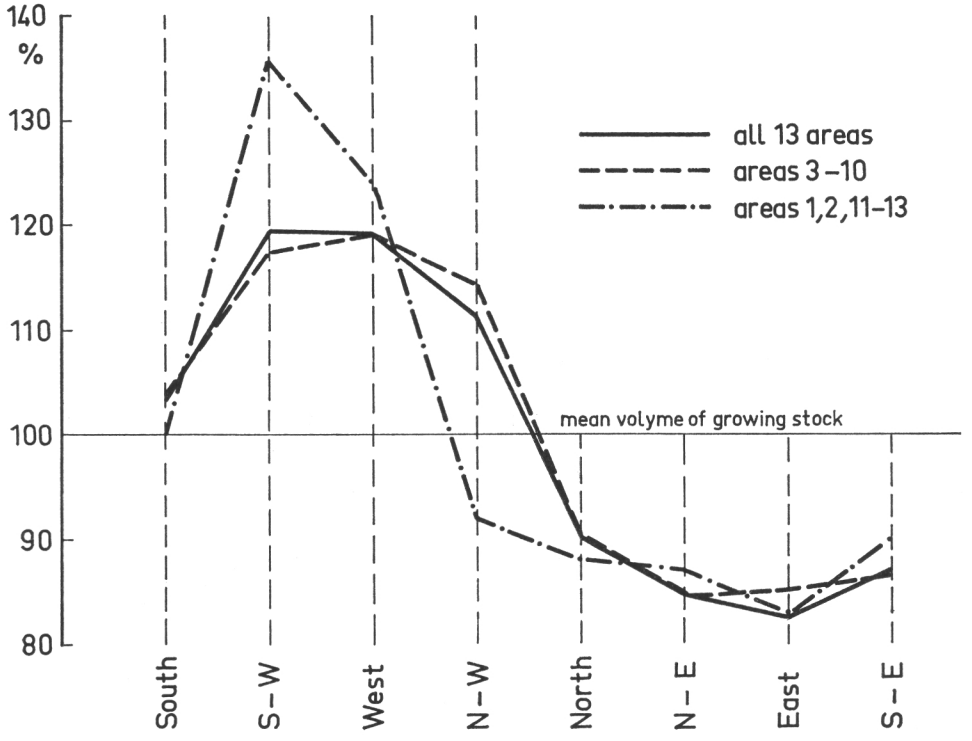


Fig. 13. Relative fluctuation of growing stock as a function of direction of slope.
Kuva 13. Keskikuutioiden suhteellinen vaihtelu kaltevuussuuntaryhmittäin.

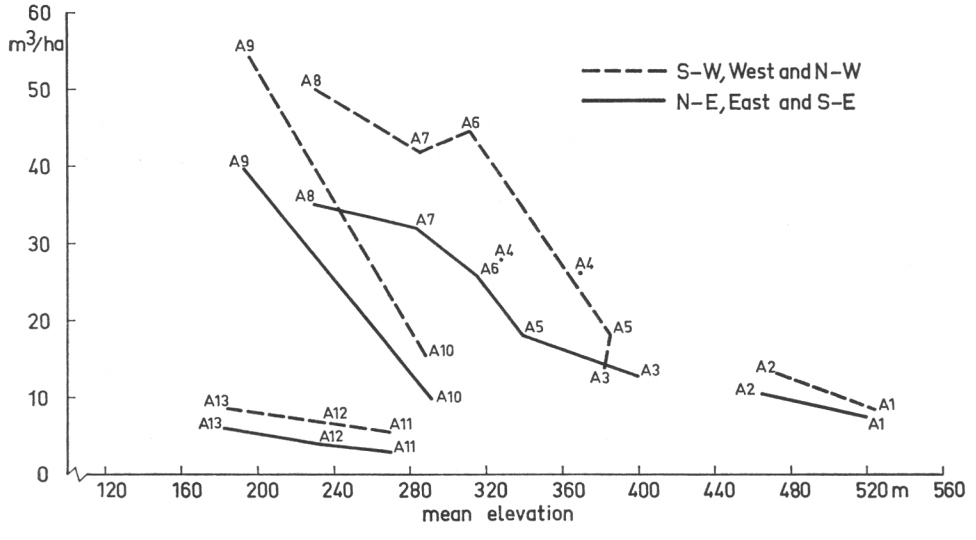


Fig. 14. Mean volumes by group of slope directions.
Kuva 14. Keskikuutiot kaltevuussuuntaryhmittäin.

6. DISCUSSION

61. Confidence of results

The material, consisting of clusters, was evenly spaced on aerial photographs. The aerial photographs, in turn, were evenly spaced over the whole study area (Figs. 2—3). Thus the location of individual clusters was free of subjective considerations.

Some of the characteristics given to the clusters (such as ground elevation above sea level) originated from topographic maps. These can be regarded as being without error. Most of the characteristics, however, were interpreted from aerial photographs; these included land form, direction of slope, land-use class and the volume of growing stock. These were subject to random as well as systematic errors.

The photo estimates of land form and slope direction were accepted as such without any field corrections. These characteristics are relatively easy to interpret, and their reliability can therefore be regarded as fairly good. The photo interpretation of land-use classes was also accepted as such. In this case, however, a distinct underestimation of the proportion of forest and poorly productive forest land was observed (cf. *Poso* and *Kujala* 1971, p. 22). This underestimation occurred especially in the birch zone and it is one reason why the volumes and differences of volumes of Figures 6—9 concerning areas 1, 2, and 11—13 are made too small. Some other reasons were suggested on page 17.

The volume of the growing stock was interpreted for the clusters by means of stereograms collected in the field, forest maps, and stand description forms provided by the National Board of Forestry. The systematic errors were corrected using the regression technique (p. 12). Because of the relatively high correlation ($r = 0.72$) between the volumes interpreted from aerial photographs and those measured in the field, and because of the large number of observations, the confidence of the sample volumes can be regarded as sufficient, at least for the areas 3—10. It is also worth noting that the errors in the absolute volumes do not necessarily have a harmful effect on the relative differences in volumes on different land forms and directions of slope.

62. Findings and conclusions

The above calculations made possible the search for a relationship between growing stock and temperature. The common assumption is that growth is especially correlated with the effective sum of temperatures (with d.d. units, cf. p. 6). It can be expected that this correlation is strong in the study area, where temperature is the decisive factor for tree growth. It seems quite acceptable to assume that the volume of growing stock and growth potential in virgin forests are strongly intercorrelated. This means that differences in volume also depict differences in growth potential.

The results obtained for different slope directions support the concept that tree growth correlates best with the temperature of the upper layer of soil (cf. *Geiger* 1957, p. 276). The maximum day temperatures in soil at a depth of 1 cm occur at about 5 p.m., on west-southwest slopes. According to the results of this study the maximum volumes are also found on west-southwest slopes (Figs. 12—13).

The gradient of the volume of growing stock was about —31 m^3/ha/100 metres (Figs. 6—9). The mean temperature gradient of the summer months was about —0.65° C/100 m. Consequently, the change of volume per 1° C is obtained by the equation —31 m^3/ha/—0.65°C = 48 m^3/ha/1° C. Assuming that the mean temperature during the growing season is 12° C in the study area and 15° C in Helsinki, and that the growing season is 1.45 times longer in Helsinki than in the study area (cf. table on page 7), the difference in volume in the respective areas could be calculated by the equation $1.45 \times (15—12) \times 48 = 209$ m^3/ha. According to this calculation, the correlation between temperature and volume or growth potential seems to be good. It also seems to be in accordance with a rule of thumb: a change of 100 kilometres in latitude corresponds to a change of 100 metres in ground elevation.

According to the table on page 7, the difference in the sum of effective temperatures between Helsinki and the study area is about 674 d.d. units. As the difference in volume of the respective areas is 209 m^3/ha, the difference in volume per 100 d.d. units is 209/6.74 = 31 m^3/ha/100 d.d. units. Since the gradient of the volume of growing stock was 31 m^3/ha/100 m, it is possible to derive another rule of thumb from this: one d.d. unit corresponds to one metre in ground elevation.

The slope clearly proved to be the most favorable land form for tree growth. It had a volume of growing stock about 15 % higher than the other three land forms, based on observations made at the same ground elevation (Fig. 11). Among the slope directions, WEST, S-W, and N-W were most favorable, about 35 % more favorable than the opposite sides: N-E, EAST, and S-E. This information may be of substantial economic value when allocating resources to forestry.

In order to prevent the timberline from moving downwards or southwards, especially protected forests have been established by law for Finnish Lapland. In practice, all forests in the study area located higher than 300 metres above sea level are under this law. For the north and north-east slopes the borderline lies 50 metres lower than for the south and south-west slopes. In light of the results of this study, the difference in elevation between the western (S-W, W, and N-W) and the eastern (N-E, E, and S-E) slopes should be 25. . .30 metres.

Observation of the change in volume from one area to another revealed that, based on areas 3 and 5—8 which are at about the same latitude, the volumes corrected for constant ground elevation become higher when moving from east to west. However, areas 9 and 10 behaved in the opposite way. The Inari-Lake area appeared to be more favorable than its western neighbor area. The volumes of the most western areas with the highest ground elevations (areas 1 and 2) were surprisingly high.

The study area represents a relatively narrow latitudinal zone. An important question is what the applicability of the general findings is to the more southern areas. The materials used do not offer any direct answer. However, it seems justifiable to assume that the general rules could be applied within the areas where temperature is indisputably the most important factor for tree growth, or thus within all of Lapland.

7. SUMMARY

This study deals with the dependence of the volume of growing stock on 1) ground elevation, 2) land form, and 3) direction of slope. The study area was located in the northernmost part of Finland where extreme conditions for tree growth prevail, and a wide topographic variation exists. The forests of the area are mostly virgin, or only slight cuttings have taken place. Therefore it is probable that the volume of the growing stock and forest growth potential strongly intercorrelate. The study area extended about 2.8 million hectares. More than 15 000 sampling units were systematically located on the study area and interpreted from aerial photographs. From these, 659 units were measured in the field.

The study produced the following main results:

The increase in ground elevation reduced the volume of growing stock by 31 m^3/ha (Figs. 6—9).

The volume on the slopes was about 15 % higher than on the other land forms of equal elevation (Fig. 11).

West-southwest slopes had higher volumes than the other directions (Figs. 12—13). The group of S-W, WEST, and N-W directions had an average of 35 % more volume than the N-E, EAST, and S-E group (Fig. 14).

REFERENCES

Angervo, J. M. 1962. Lyhyt sääoppi ja sääennustajan opas. Keuruu.

Geiger, R. 1957. *The climate near the ground.* Second printing, revised. Cambridge, Massachusetts.

Hellmers, H., M. Genthe and F. Ronco. 1970. Temperature affects growth and development of engelmann spruce. *Forest Science* 16.4: 447—452. Washington, D. C.

Huovila, S. 1970. Some features of the microclimate within hilly regions in Finland. »Proceedings of the Helsinki Symposium» Ecology of subarctic regions, pp. 63—66. Unesco, Paris.

—»— 1971. Inversiotutkimuksia Lapissa. Geofysiikan päivät Oulussa 17—18. 6. 1971. Toim. *Jukka Yliniemi*, Helsinki.

Kolkki, O. 1966. Tables and maps of temperature in Finland during 1931—1960. 14 tables and 54 maps. Suplement to the meteorological yearbook of Finland 65.1a—1965. Helsinki.

Mork, E. 1968. Økologiske undersøkelser i fjellskogen i Hirkjølen forsøksområde. Summary: Ecological investigations in the mountain forest at Hirkjølen experimental area. *Meddelelser fra det norske skogforsøksvesen* 93.25.7: 467—614. Vollebekk.

Oinonen & Sarvas & Siren. 1966. Lapin suojametsien käsittelyohjeet. Konekirjoite.

Poso, S. ja M. Kujala. 1971. Ryhmitetty ilmakuva- ja maasto-otanta Inarin, Utsjoen ja Enontekiön metsien inventoinnissa. Summary: Groupwise sampling based on photo and field plots in forest inventory of Inari, Utsjoki and Enontekiö. *Folia Forestalia* 132: 1—40. Helsinki.

Sarvas, R. 1952. Pohjois-Suomen kuivien kangasmetsien ekologiasta. Summary: On the ecology of dry moss-lichen forests in North Finland. *Metsäntutkimuslaitoksen Julkaisuja* 41.1: 1—27.

—»— 1967. Climatological control of flowering in trees XIV. IUFRO-KONGRESS, Section 22: 15—30. München.

The Finnish meteorological institute. 1971. Meteorological yearbook of Finland. Volume 70, Part 1b 1970. Helsinki

SELOSTE

Topografian vaikutus puuston kuutiomäärään

Tutkimus käsittelee maaston korkeuden, maaston muodon ja maaston kaltevuussuunnan vaikutusta puuston kuutiomäärään. Aineistot kerättiin valtakunnan metsien viidennen inventoinnin yhteydessä Inarin, Utsjoen ja Enontekiön alueilta ilmakuva- ja maasto-otantaan perustuvalla menetelmällä (ks. Poso ja Kujala 1971). Alueen pinta-ala on noin 2.8 milj. ha. Ilmakuvilta tutkittujen rypäiden määrä oli 15 441. Näistä mitattiin maastossa 659 ryvästä (kuvat 1—3).

Tutkimusalueen metsät olivat suurimmaksi osaksi luonnontilassa. Tämän johdosta topografian ja kuutiomäärän riippuvuussuhteet ilmentävät todennäköisesti hyvin myös puuston kasvukyvyn ja topografian välistä riippuvuutta.

Tutkimuksessa saadut päätulokset olivat seuraavat:

a) Maaston korkeuden lisääntyessä 100 metrillä puuston kuutio väheni 31 m^3/ha eli puuston kuutiomäärän gradientti oli —31 m^3/ha/100 m (kuvat 6—9).
b) Rinteiden kuutiomäärät olivat noin 15 % suuremmat kuin keskimäärin muiden samalla korkeudella sijaitsevien maastomuotojen (kuva 11).
c) Kaltevuussuunnista länsi—lounainen oli puuston kuutiomäärältään suurin (kuvat 12—13). Kolme suurikuutioisinta suuntaa olivat länsi, lounas ja luode. Niiden kuutiomäärä oli keskimäärin 35 % suurempi kuin pienikuutioisimpien suuntien: koillinen, itä ja kaakko (kuva 14).

Lapin läänin alueella lämpötila on puuston kasvua eniten rajoittava tekijä. Saadut päätulokset ja olemassa olevat tiedot lämpöoloista tekivät mahdolliseksi seuraavat hypoteettiset päätelmät:

a) Kasvukauden keskilämpötilan laskiessa 1°C:lla kuutiomäärä laskee 48 m^3/ha eli gradientti on 48 m^3/ha/1°C.
b) Kasvukauden tehollisen lämpösumman laskiessa 100 d.d. yksikköä puuston kuutiomäärä laskee 31 m^3/ha eli gradientti on 31 m^3/ha/100 d.d. yksikköä.
c) Lämpösumman gradientti on —100 d.d. yksikköä/100 m.
d) Suojametsärajan pitäisi koillis-, itä- ja kaakkoisrinteillä olla noin 30 m alempana kuin lounais-, länsi- ja luoteisrinteillä.

KUUSEN YMPÄRYSMITAN KASVUA LYHYIN AIKAVÄLEIN SELITTÄVIÄ MALLEJA

JAAKKO SIMPANEN

SUMMARY IN ENGLISH

MODELS EXPLAINING THE GROWTH OF SPRUCE CIRCUMFERENCE OVER SHORT TIME INTERVALS

HELSINKI 1972

ISBN 951-40-0061-7

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

ALKUSANAT

Metsänparannustöiden käytännöllisen toteuttamisen peruslinjoja on maassamme ohjattu jo vuosisadan alussa perustettujen kenttäkokeiden avulla. Vuonna 1954 aloitettiin allekirjoittaneen toimesta Parkanossa puukohtaisten kasvuvaihteluiden tutkimisen metodiikan kehittäminen. Vuonna 1956 siirrettiin tutkimukset Vilppulan kokeilualueeseen Jaakkoinsuolle, jonne perustettiin metsäekologiset erikoiskoekentät metsänparannustöiden perusteiden mahdollisimman monipuolista ja tarkkaa tutkimista varten. Metsänparannustöiden toteuttamisessa on hyvin tärkeää tietää, mitkä ovat kasvuolosuhteissa aikaansaatujen muutosten vaikutukset kasvuun erilaisissa tekijäyhdistelmissä. Tältä pohjalta edeten voidaan ohjata metsänparannusmintaa käytettävissä olevin varoin tapahtuvana mahdollisimman suuriin puuston ja sivutuotannon lisäyksiin pääsemiseksi. Käytännön töiden kannalta tärkeimmät ensimmäisen vaiheen päätulokset on esitetty julkaisuissa Huikari (1958), Huikari (1965) sekä Huikari ja Paarlahti (1967).

Metsäekologisilla erikoiskoekentillä suoritettujen tutkimusten kanssa on samanaikaisesti mitattu noin 500 mänty-, kuusi- ja koivukoepuun kasvureaktioita yhteensä 54 eri kasvupaikalla. Materiaali on kerätty tilastomatemaattisen kasvumallin kehittämistä ja testaamista varten. Perimmäisenä tarkoituksena on luoda puiden kasvureagoinnille matemaattinen perusmalli, jota voitaisiin käyttää mm. metsänparannustöiden tietokoneohjelmointiin myös sellaisilla kasvualustoilla, joissa nykyään käytettävät silmämääräiset toimenpidetarvemääritykset eivät ole mahdollisia. Suoritetut kasvututkimukset osoittavat, että jo kertaalleen perusparannetuilla kasvullisilla metsämailla on suurin mahdollisuus yllättäviin ja silmämääräisesti vaikeasti selvitettäviin kasvutappioihin jonkin tekijän muodostuessa kiivaassa kasvutapahtumassa äkillisesti minimitekijäksi.

Nyt esitettävä tutkimus on osamateriaaliin perustuva esityö, joka on kokonaan valtiotieteen kandidaatti Jaakko Simpasen itsenäisesti tekemä allekirjoittaneen keräämään materiaaliin ja antamaan tehtävään perustuneena. Kenttämittausmateriaali on kokonaisuudessaan sangen laaja ja sikäli jopa ainutlaatuinen, että on pystytty mittaamaan samojen koepuiden kasvunvaihteluita jopa päivittäin useiden vuosien ajan. Tässä työssä on

lähdetty osamateriaalin käsittelystä ottaen ensin koelaskentojen aineistoksi 63 kuusikoepuuta. Tähän mennessä kehitettyjen mallien edelleenkehittely on jo aloitettu samoin kuin ekologisten erikoiskenttien aineistojen muuntaminen testiaineistoksi.

Koekenttien ja mittauskohteiden perustamisen kenttätöistä, ylläpidosta, mittausvälineiden kunnostuksista sekä mittausten suorituksista ja valvonnasta on vastannut kenttämestari Eero Pelkonen erittäin korkeaa kiitosta ansaitsevalla tavalla. Hän on pienillä kustannuksilla ja vaikeissa olosuhteissa pystynyt hoitamaan materiaalin keruun ja koekenttien käsittelyn. Työn eri vaiheissa ovat avustaneet metsät.lis. Kimmo Paarlahti, fil.lis. Antti Reinikainen, luonnont.kand. Heikki Veijalainen ja metsänhoitaja Heikki Ravela. Pääosan materiaalien valmistelevasta laskentatyöstä ovat suorittaneet ylioppilas Tapani Holopainen, luonnont.kand. Tuula-Marja Hänninen, ylioppilas Airi Piira ja insinööri Jorma Pyy. Julkaisu on supistelma Helsingin Yliopiston valtiotieteellisessä tiedekunnassa hyväksytystä tilastotieteen laudaturtyöstä, jonka ovat tarkastaneet professori Leo Törnqvist sekä professori Hannu Väliaho. Professori Väliahon ehdotuksesta on käsikirjoitukseen tehty eräitä korjauksia.

Helsingissä helmikuun 15 päivänä 1973.

Olavi Huikari

SISÄLLYSLUETTELO

Sivu

1. Johdanto 7
2. Aineisto 9
   2.1. Yleistä 9
   2.2. Kasvualustaa kuvaavat muuttujat 12
   2.3. Aikasarjat 14
   2.4. Aineiston käyttökelpoisuuden tarkastelu 16
3. Tutkimuksen rajoittaminen ja täsmentäminen 18
   3.1. Rajoittaminen osa-aineistoon 18
   3.2. Tutkimuksen päämäärä 18
4. Perusmuunnokset 29
5. Kasvumallin muodostaminen 23
   5.1. Kasvuprosessin luonne 23
   5.2. Ympärysmitan kasvumallit 25
      5.2.1. Yleistä 25
      5.2.2. Kvadraattinen malli 26
      5.2.3. Kerrannainen malli 27
6. Analyysimenetelmä 31
   6.1. Yleinen lineaarinen regressiomalli 31
   6.2. Jäännösvirheiden tarkastelu 33
7. Tulokset ja niiden tarkastelu 35
   7.1. Empiiriset mallit 35
   7.2. Tulosten tarkastelu 43
8. Tiivistelmä 45

Kirjallisuusluettelo 47

Summary in English 49

1. JOHDANTO

Puun kasvun ja ympäristötekijöiden välisen riippuvuuden selvittäminen on välttämätöntä pyrittäessä ymmärtämään kasvun perusolemusta. Aihetta on käsitelty lukuisissa eri puulajeja koskevissa tutkimuksissa eri puolilla maapalloa. Pääosa on kohdistunut pitkähkön ajanjakson kuluessa havaittaviin ilmiöihin. Näiden julkaisujen perusteella tunnetaan eri puulajien elinikäisen kehityksen oleelliset piirteet. Pienimpänä aikayksikkönä on yleisesti käytetty vuotta. Selvästi havaittavien vuosilustojen vuoksi on tällöin ollut mahdollista yhdellä kerralla suorittaa kasvun kuvaamiseen ja analysointiin tarvittavat mittaukset ja täten ulottaa tutkimus koko puun elinaikaa koskevaksi. Suomessa tällaisia tutkimuksia ovat tehneet Laitakari (1920), Hustich (1948), Mikola (1950) ja Siren (1955).

Kun pyritään selvittämään ympärysmitan kasvua kasvukauden aikana perättäisinä vuosina, on käytettävä sellaisia mittausmenetelmiä, joiden avulla kasvutapahtumaa voidaan seurata hyvinkin lyhyin aikavälein. 1950-luvulla on metsäntutkimuslaitoksen suontutkimusosastolla Huikarin aloitteesta kehitetty ns. pantamenetelmä puiden ympärysmitan kasvun mittaamiseen (kuva 2). Kanerva (1963) sekä Huikari ja Paarlahti (1967) ovat todenneet menetelmän luotettavaksi.

Puun kasvuun vaikuttavat ympäristötekijäin lisäksi myös geneettiset tekijät. Yleensä puut kasvavat lämpimänä vuodenaikana, ja kasvu hidastuu tai lakkaa kokonaan kylmimpään kauteen siirryttäessä. Pituuskasvun periodisuus määräytyy enimmäkseen perinnöllisten tekijöiden mukaan, kun taas läpimitan kasvu riippuu etupäässä ympäristötekijöistä (Kramer ja Kozlowski 1960).

Puu ei yleensä koskaan kasva tasaisesti koko potentiaalisen kasvukauden ajan. Mm. Kramer (1957) on todennut, että mänty kasvaa jaksoittain, vaikka kasvihuoneessa pidetäänkin olosuhteet pysyvästi edullisina. Syyt kasvun ajoittaisuuteen tunnetaan vain osittain. Kasvun jatkumiseen, jota kasvuhormonaalisen järjestelmän kautta mm. valojaksottaisuus ja valon fysikaalinen laatu säätelevät (mm. Lang 1957 ja Lockhart 1961), on todettu mm. eräiden mineraaliaineiden kertymisen vaikuttavan estävästi (Hemberg 1940).

Vuorokautisia puun paksuuden vaihteluja on tutkinut mm. McDougall (1921 ja 1938). Hän on todennut puun kutistuvan päivällä ja turpoavan aamuyöstä. Sama on todettu myös Huikarin ja Paarlahden (1967) tutkimuksissa. Kramer (1957) on todennut, että kasvu on yleensä voimakkain kun yön ja päivän lämpötilat eroavat toisistaan paljon ja heikoin niiden ollessa likimain samat.

Läpimitan kasvun kannalta on Friesner (1942) todennut veden saannin olevan ensiarvoisen tärkeää. Mikola (1950) on todennut, että läpimitan kasvu saattaa riippua maan kosteudesta, ja Frittsin (1958) mukaan on selvä korrelaatio maan kosteuden ja läpimitan kasvun välillä. Richardsin ja Wadleichin (1952) mukaan maan kosteudella on läpimitan kasvua rajoittava vaikutus jo ennen kuin kyllästyskosteus on saavutettu. Huikari ja Paarlahti (1967) ovat todenneet turvemailla ympärysmitan kasvun kannalta optimaaliseksi pohjaveden syvyydeksi 30—50 cm. Ympärysmitan kasvun alkaminen ja sen vuotuinen suuruus eivät riipu kasvunaikaisista maan lämpötiloista. Tutkimuksessa todettiin, että ympärysmitan kasvun alkamisen määrännee päivän pituus ja vuorokauden keskilämpötilan kohoaminen tietyn rajan, n. 10° C, yläpuolelle. Mikolan (1950) mukaan kasvu selittyy suurelta osalta edellisen vuoden kasvuolosuhteiden perusteella. Leikola (1969) on havainnut viiveettömien ympäristötekijäin vaikutuksen sädekasvuun peittyvän puun rungon hydrostaattisiin vaihteluihin. Sen sijaan päivän viiveellä auringon säteily ja ilman lämpötila korreloivat parhaiten sädekasvun kanssa. Kahden päivän viive ympöristötekijöissä on jo liian suuri.

Kun tutkimukset eri tekijöiden vaikutuksesta puiden kasvuun on suoritettu sangen erilaisissa ilmastollisissa olosuhteissa ja eri roduilla, saattavat tulokset olla toisistaan poikkeaviakin, koska kasvutekijäin keskeiset suhteet vaihtelevat voimakkaasti eri ilmastovyöhykkeissä. Siksi on tärkeää, että Suomen ilmasto-oloissa suoritetaan kasvutekijätutkimuksia, sillä täällä saattavat mm. maan ja ilman lämpöolot vaikuttaa toisella tavalla kuin muualla. On myös tärkeää saada selvyys maan ja ilman kosteuden vaikutuksesta kasvuun.

Aikaisemmissa tutkimuksissa, joissa on käytetty kasvukauden aikana lyhyin aikavälein mitattuja aikasarjoja, mittauksia on tehty enimmäkseen yhtenä tai kahtena peräkkäisenä vuotena. Tässä tutkimuksessa käytettävä aineisto käsittää kaikkiaan yhdeksän peräkkäisen vuoden havainnot samoista puista. Täysin käyttökelpoista aineistoa on seitsemän peräkkäisen vuoden ajalta.

2. AINEISTO

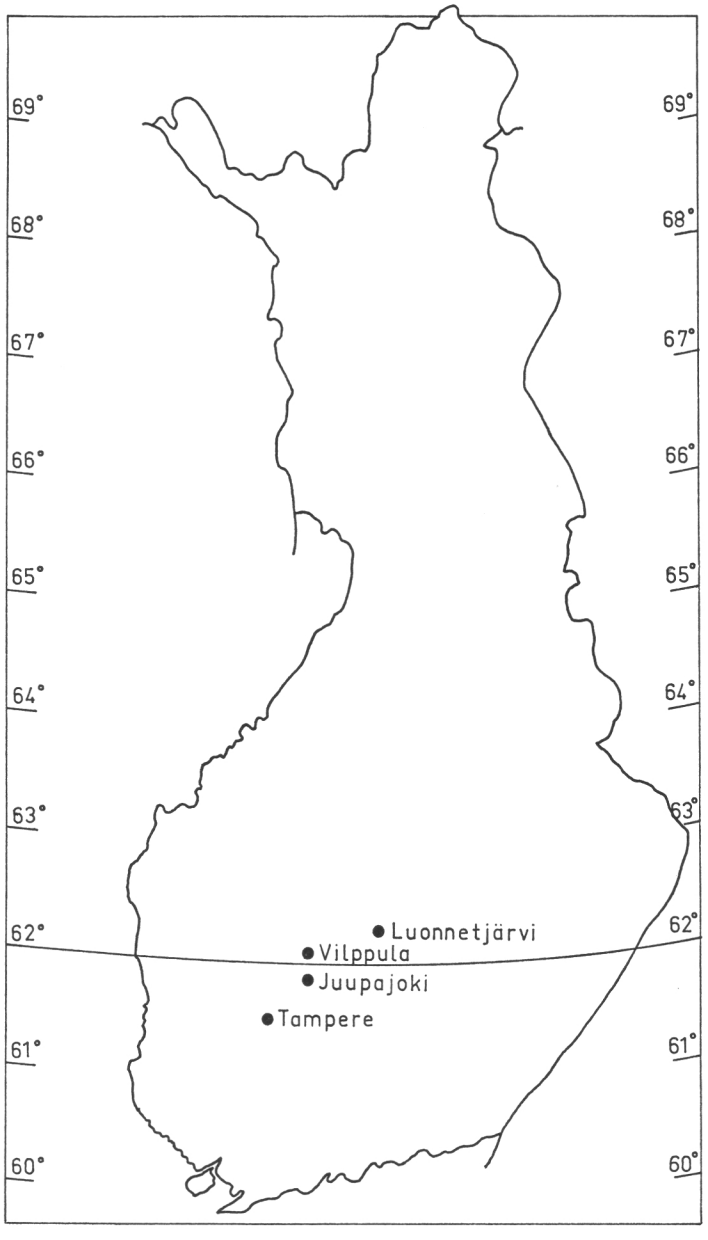
2.1. Yleistä

Varsinainen aineisto kerättiin metsäntutkimuslaitoksen suontutkimusosaston toimesta Keski-Suomesta, Vilppulan kunnasta. Koekenttien sijainti on 62°03′ pohjoista leveyttä (N) ja 24°34′ itäistä pituutta (E). Mittaamatta jääneitä muuttujia voitiin korvata Juupajoen (61°50′ N, 24°17′ E), Luonetjärven (62°24′ N, 25°40′ E) ja Tampereen (61°28′ N, 23°44′ E) sääasemien tiedoilla (vrt. kuva 1). Paikkakuntien korkeudet meren pinnasta ovat Juupajoki 120 m, Luonetjärvi 140 m, Tampere 84 m ja Vilppula 120 m, joten korkeuserot ovat vähäiset.

Vuonna 1956 aloitettiin Jaakkoin- ja Kaakkosuolla yhteensä 55 koalalla 492 puun ympärysmitan vaihtelujen mittaukset pantamenetelmällä sekä samanaikaisesti kasvuun vaikuttavien ympäristötekijäin mittaukset. Kukin koeala muodostui metsiköstä, joka oli puustoltaan, ravinteisuudeltaan ja vesitaloudeltaan mahdollisimman homogeeninen ja jota rajoittivat näissä suhteissa erilaiset alueet. Koealat olivat epäsäännöllisen muotoisia valintatapansa vuoksi.

Puut poimittiin erikseen kultakin koealalta vallitsevan latvuskerroksen puista. Tällöin käytettiin menetelmää, jolla yritettiin saada satunnaisotos erikseen jokaiselta koealalta. Poiminnassa oli mukana kaksi miestä, joista toinen oli koealan reunalla ja toinen käveli edestakaisin koealalla tarkkailematta puustoa. Koealan reunalla olevan miehen käskystä kävelijä otti otokseen lähimmän edessään olevan puun, jos se kuului vallitsevaan latvuskerrokseen, mutta muuten jatkoi kävelyään seuraavaan pysähtymiskäskyyn asti. Vallitsevaan latvuskerrokseen rajoittumiseen oli syynä se, että mukaan haluttiin vain samoissa valoisuusoloissa kasvavia puita.

Edellä mainittu asetelma muuttui tutkimusaikana. Koeala 16 poistettiin v. 1957, koealat 43 ja 44 v. 1959, koeala 8 v. 1960 sekä koeala 18 v. 1963. Lisäksi puita poistettiin useilta koealoilta (vrt. taulukko 1). Vuonna 1964 oli jäljellä 407 puuta, joista mäntyjä oli 242, koivuja 102 ja kuusia 63. Vuosina 1957 ja 1963 puut poistettiin vahingossa. Sen sijaan koealojen 8, 18, 43 ja 44 puut käytettiin muihin kokeisiin. Muut kokeesta poistetut puut kuolivat eri syistä.



Kuva 1. Aineiston keruupaikkakuntien sijainti Suomen kartalla.

Pysyväisluonteiset ja hyvin hitaasti muuttuvat kasvutekijät määritettiin v. 1956. Sen jälkeen niitä tarkkailtiin usein muiden mittausten yhteydessä, mutta mitään merkittäviä muutoksia ei havaittu. Muuttuvat kasvutekijät mitattiin aikasarjoina puiden kasvumittausten yhteydessä. Mittauk-

Taulukko 1. Perustietoja vuosina 1958—1964 mitatusta aineistosta

Vuosi	Mittaukset: Puiden kasvu: Aloituspäivä	Puiden kasvu: Lopetuspäivä	Puiden kasvu: Havaintokertojen lukumäärä	Kasvutekijät: Aloituspäivä	Kasvutekijät: Lopetuspäivä	Kasvutekijät: Havaintokertojen lukumäärä	Puiden lukumäärä: Koivu	Puiden lukumäärä: Kuusi	Puiden lukumäärä: Mänty	Poistettujen puiden lukumäärä: Koivu	Poistettujen puiden lukumäärä: Kuusi	Poistettujen puiden lukumäärä: Mänty
1956	14. 5.	4. 12.	31	31. 5.	23. 8.	23	135	79	278	3	2	3
1957	(5. 2.) [1] 10. 4.	(24. 10.) [1] 29. 8.	(32) [1] 30	27. 4.	29. 8.	28	132	77	275	20	8	5
1958	7. 5.	(19. 11.) [1] 25. 8.	(26) [1] 24	12. 5.	1. 10.	24	112	69	270			
1959	(16. 1.) [1] 28. 4.	(28. 10.) [1] 4. 9.	(40) [1] 37	28. 4.	24. 9.	37	112	69	270			13
1960	29. 4.	(19. 10.) [1] 19. 9.	(33) [1] 32	29. 4.	19. 10.	33	112	69	257	2	6	9
1961	11. 4.	24. 10.	42	2. 5.	24. 10.	38	110	63	248			
1962	13. 4.	26. 10.	44	1. 5.	18. 9.	38	110	63	248	1		
1963	21. 4.	8. 10.	41	30. 4.	8. 10.	40	109	63	248	7		6
1964 [2]	18. 4.	29. 9.	42	28. 4.	29. 9.	41	102	63	242			

[1]) Yksittäisiä havaintoja (havaintoväli 1 kk)
[2]) Vielä v. 1964 mukana olleiden puiden vv. 1958—1964 havaintokertojen lukumäärät: koivu 25 296, kuusi 15 624 ja mänty 60 058.

sia tehtiin yleensä vuorotellen joka kolmas ja joka neljäs päivä paitsi syksyllä ja keväällä pitemmin välein, koska muutokset olivat silloin hyvin vähäisiä. Poikkeuksen muodosti vuosi 1960, jolloin puita mitattiin säännöllisesti neljän päivän välein 8. 5.—16. 8. välisenä aikana. Mittausten alkamis- ja loppumisajankohdat sekä mittausjaksojen pituus eri vuosina esitetään taulukossa 1.

2.2. Kasvualustaa kuvaavat muuttujat

Jaakkoin- ja Kaakkosuot ovat jo luonnostaan puuston kasvualustoina heterogeenisia. Lisäksi ihmiset ovat muuttaneet kasvuolosuhteita. Sen tähden paremman käsityksen saamiseksi kuusiaineisto, johon tutkimus rajoitettiin, luokiteltiin seuraavasti (H u i k a r i ym. 1963)

— pääluokka (4 tasoa)

— ravinteisuusluokka (5 tasoa)

Kasvupaikan mukaan (mahdollisesti) jatkuvasti muuttuvia tekijöitä olivat

— turvekerroksen paksuus, cm

— puun etäisyys ojasta, m

Kun tarkastellaan edellä mainitun jaottelun mukaan tehtyä taulukkoa 2, niin havaitaan, että aineisto jakautuu luokkiin hyvin epätasaisesti.

Taulukossa 2 käytetyt koodit:

Pääluokka		Ravinteisuusluokka		Metsikön tiheys	
Koodi	Taso	Koodi	Taso	Koodi	Taso
1	kangas	1	lehto	0.4, 0.5	kaksi harvaa astetta
2	turvekangas	2	ruoho	0.6	välttävän tiheä
3	rämemuuttuma	3	suursara, mustikka	0.7	tyydyttävän tiheä
4	ojikko	4	piensara, puolukka	0.8	tiheä
		5	tupasvilla, isovarpu	0.9	melkein täystiheä
				1.0	täystiheä

Taulukko 2. Kuusiaineiston tarkat perustiedot vuodelta 1958 (pituudet vuodelta 1956).

Koealakohtaiset tiedot						Puukohtaiset tiedot						Koealakohtaiset tiedot						Puukohtaiset tiedot					
N:o	Pl	Rl	Tp	Mt	Aika ojitus-sesta v	N:o	Ikä[1] v	Talou-dellinen ikä v	Etäi-syys ojasta m	Pak-suus cm	Pituus m	N:o	Pl	Rl	Tp	Mt	Aika ojitus-sesta v	N:o	Ikä[1] v	Talou-dellinen ikä v	Etäi-syys ojasta m	Pak-suus cm	Pituus m
17	2	2	45	1.0	49	1	51	51	25	19.1	18	29	1	4	0	0.5	29	33	57	42	50	13.6	14
						2	51	49	22	22.3	19							34	64	45	50	15.4	15
						3	51	49	23	21.2	19							35	72	54	50	15.4	13
						4	46	46	25	21.2	20	30	4	3	25	0.7	29	36	96	96	28	17.2	12
19	2	3	30	1.0	43	5	81	43	33	10.2	11							37	81	81	26	20.6	16
						6	78	57	36	14.2	11							38	77	63	23	15.4	14
						7	101	60	39	18.4	17							39	88	56	22	20.6	16
						8	50	48	38	13.4	14	31	2	3	10	0.8	29	40	44	29	91	13.8	13
20	2	3	35	0.5	43	9	96	54	39	22.8	16							41	48	29	91	10.8	10
						10	92	46	42	19.9	16							42	32	29	88	10.8	8
						11	90	43	25	20.2	17	32	2	2	30	0.7	49	43	52	49	49	15.1	12
21	2	3	35	1.0	49	12	96	49	48	15.6	15							44	47	47	52	11.0	8
						13	50	49	53	9.5	9							45	42	42	59	17.0	15
						14	63	49	62	17.8	17	33	2	3	50	0.7	49	46	67	55	15	16.5	14
						15	93	54	60	14.7	14							47	70	49	10	13.4	12
22	2	3	38	0.7	49	16	68	54	53	22.3	18	38	2	3	70	0.8	49	48	62	49	46	21.3	19
23	1	4	0	0.7	37	17	56	37	30	16.7	12							49	72	49	44	26.2	20
						18	62	37	30	12.5	10							50	106	59	41	22.2	15
						19	61	49	30	17.3	13	49	2	3	80	0.7	49	51	83	49	30	12.3	10
						20	61	40	30	15.5	11							52	73	50	28	17.3	14
24	3	4	35	0.4	20	21	36	23	27	13.6	10	50	2	2	20	0.7	49	53	105	54	27	21.4	18
						22	52	30	32	10.5	10							54	42	42	21	20.8	15
25	3	4	35	0.6	20	23	53	30	13	19.9	15							55	45	45	22	25.9	16
						24	82	23	13	17.8	11	51	4	5	70	0.8	43	56	180	160	48	19.1	12
26	3	4	15	0.7	20	25	62	50	25	10.4	11							57	150	150	38	9.0	7
						26	62	33	26	14.5	12							58	168	168	42	13.0	11
27	3	4	20	0.8	49	27	52	49	27	13.5	12	52	4	4	8	0.7	43	59	88	65	15	19.6	16
						28	57	49	59	12.5	10	53	2	3	25	0.7	43	60	102	46	19	16.3	13
						29	57	49	62	11.6	10							61	100	43	19	12.3	9
28	1	4	0	0.7	49	30	67	49	40	12.7	12							62	100	50	12	22.4	15
						31	53	49	40	14.5	15							63	100	52	15	25.8	15
						32	44	44	40	14.6	13												

[1]) Ikä määritetty rinnankorkeudelta

Lyhennysten selitykset:
Mt = metsikön tiheys
Pl = pääluokka
Rl = ravinteisuusluokka
Tp = turvekerroksen paksuus

2.3. Aikasarjat

Puiden ympärysmittojen kasvun vaihtelujen selittäjiksi mitattiin aikasarjoina seuraavat tekijät

— ilman minimi- ja maksimilämpötila, °C
— ilman suhteellinen kosteus (vuodesta 1961 lähtien)
— maan lämpötila 5 ja 20 cm:n syvyydessä, °C
— sademäärä, ml/dm^2
— pohjaveden etäisyys maan pinnasta, cm
— puun ikä, v
— puun ristiin mitattu rinnankorkeusläpimitta, $D_{1,3}$
— puun pituus, m (vain v. 1956)

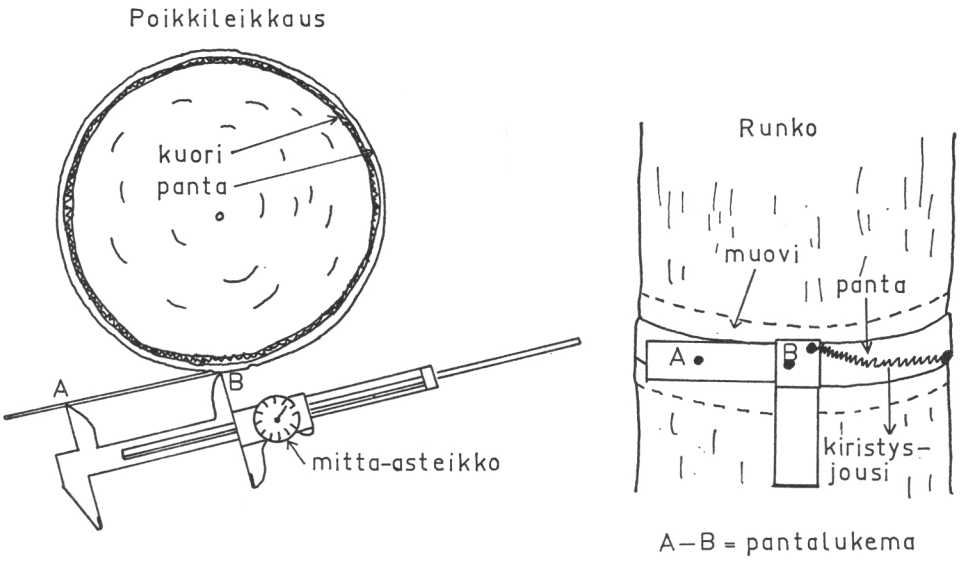
Mittaamatta jääneitä tärkeitä kasvutekijöitä korvattiin seuraavasti

— käpyjen runsaus, kpl/puu, Vilppulasta[1])
— kokonaissäteily, cal/cm^2, Luonetjärven lentokentän sääasemalta[2])
— auringon paiste, h/vrk[2])
— tuuli, m/s, Tampereen lentokentän sääasemalta[3])
— lämpötilakäyrät koko mittausajalta, °C, Yliopiston metsäharjoitteluasemalta Hyytiälästä[2])
— ilman suhteellinen kosteus klo 8.00, 14.00 ja 20.00 Hyytiälästä.

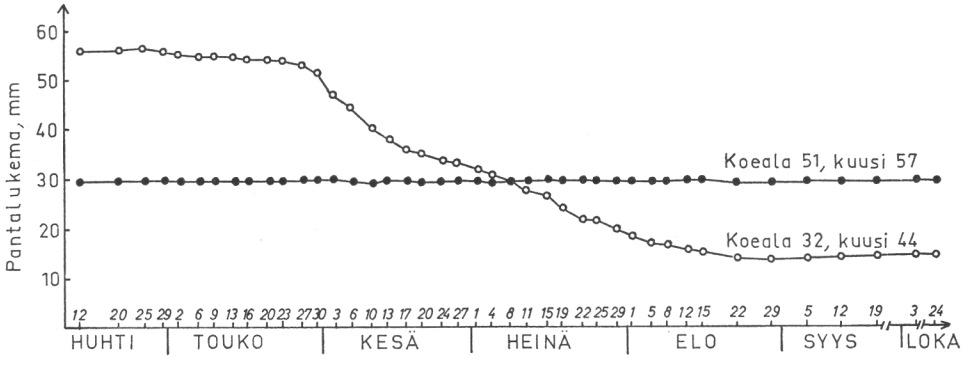
Puun ympärysmitan kasvuvaihtelut mitattiin pantamenetelmällä vaihtelevin aikavälein kasvukauden aikana. Tällöin saatiin jokaiselle puulle aikasarja, ns. pantalukemasarja, joka kunakin kasvukautena sai erään alkuarvon. Pantalukemasarja pieneni kasvukauden loppua kohti. Sen arvo mittaushetkellä t oli mittaushetken t-1 lukeman arvo vähennettynä ympärysmitan muutoksella välillä (t-1, t). Puun kutistumisesta ja turpoamisesta johtuen pantalukema hetkellä t voi olla joko hetken t-1 arvoa suurempi tai niin paljon pienempi, ettei todellinen kasvu ole voinut aiheuttaa sitä. Menetelmä esitetään kuvassa 2. Kuvassa 3 esitetään esimerkkinä koealojen 32 ja 51 kuusien n:o 44 ja n:o 57 v:n 1961 pantalukemasarjat graafisesti. Kuusi n:o 44 kasvoi kyseisenä vuotena koko aineiston kuusista eniten ja kuusi n:o 57 vähiten.

Ilman minimi- ja maksimilämpötilat saatiin sekä minimi- ja maksimimittareiden että vuodesta 1961 alkaen jatkuvaa käyrää piirtävän piirturin (termohygrografin) havainnoista. Minimi- ja maksimimittareiden luonteen vuoksi mittaushetken t havaintoarvot olivat välillä (t-1, t) sattuneet matalin ja korkein lämpötila.

[1]) Metsälehti
[2]) Suomen Meteorologinen Vuosikirja
[3]) Ilmatieteenlaitoksen julkaisematonta aineistoa



Kuva 2. Pantamittausmenetelmä. Mitta-asteikon tarkkuus 0.02 mm.



Kuva 3. Koealan 32 kuusen n:o 44 ja koealan 51 kuusen n:o 57 pantalukemasarjat v. 1961. Koealan 32 pääluokka on 2 ja ravinteisuusluokka 2 (vrt. taulukko 2). Koealan 51 pääluokka on 4 ja ravinteisuusluokka 5.

Suhteellinen kosteus mitattiin termohygrografilla vuodesta 1961 alkaen. Koko mittausjaksolta saadaan suhteelliset kosteudet klo 8.00, 14.00 ja 20.00 Hyytiälän arvoista, jotka on laskettu tuulettamattoman psykrometrin havainnosta Sprungin kaavalla[1]).

Maan lämpötilat 5 ja 20 cm:n syvyydellä mitattiin maahan upotetuilla elohopeamittareilla, jotka oli suojattu suoralta auringonsäteilyltä.

[1]) Arvot saatiin valmiiksi laskettuina Ilmatieteen laitokselta.

Sademäärä mitattiin 100 cm²:n vedenkokoamisaukoilla varustetuilla sademittareilla, joiden aukko oli 30 cm maanpinnan yläpuolella. Ne olivat koealoilla 1, 25, 29, 37, 48 ja 54. Havaintohetken t arvo kussakin mittarissa oli välillä (t-1, t) kertynyt sademäärä.

Pohjaveden syvyyden mittaamista varten jokaiselle koealalle kaivettiin kaivoja, joista mittaus suoritettiin.

Puiden läpimitat ja pituudet mitattiin v. 1956. Lisäksi syksyllä 1970 mitattiin vuotuiset sädekasvut kairaamalla kustakin puusta lastu 1,3 m:n korkeudelta. Pituuskasvua ei mitattu, koska mittaaminen olisi ollut erittäin vaikeaa.

2.4. Aineiston käyttökelpoisuuden tarkastelu

Ennen tutkimuksen rajoittamista ja varsinaisten analyysien suorittamista tutkittiin koko kuusiaineisto mahdollisten puutteiden ja virheiden selvittämiseksi. Jo aineistoa koottaessa oli tarkkailtu ja merkitty muistiin todettuja virheitä, joten tarkastustyö helpottui huomattavasti. Esimerkiksi pantojen katkeamiset ja siirtymiset oli merkitty havaintosarjoihin.

Vuonna 1956 käytetty otantamenetelmä oli huono, joten koealoilta poimituista otoksista saadut parametrien estimaatit saattavat olla harhaisia (Deming 1960, Goulden 1956 ja Yates 1960), ja lisäksi aineiston jakautuminen luokittelusoluihin oli hyvin epätasainen (vrt. taulukko 2). Harhaa voivat edelleen aiheuttaa vuosien kuluessa tapahtuneet puiden poistamiset (Yates 1960). Mutta kasvua tutkittaessa vakavasti vaikuttavan harhan ilmenemismahdollisuus pienenee, jos harha on tasaista.

Kiinteät ja hitaasti muuttuvat kasvutekijät määriteltiin ja mitattiin erittäin hyvin. Lisäksi koekentät olivat valvonnan alaisina. Havaituista muutoksista tehtiin merkintöjä päiväkirjaan. Kyseessä olevissa kasvutekijöissä ei tapahtunut mitään merkittäviä muutoksia koko mittausjakson aikana.

Aikasarjoissa oli vuosien 1956—57 aineistoissa vakavia puutteita. Vuonna 1956 pahimmat heikkoudet olivat kasvutekijäin mittausten rajoittuminen 31. 5.—23. 8. väliseen aikaan, minimi- ja maksimilämpömittareiden toistuva rikkoutuminen, maan lämpötilan mittaaminen vain 30 cm:n syvyydeltä, pohjavesikaivojen mataluus (ei saatu havaintoja kesäkuun puolivälin jälkeen) ja pantojen paikoiltaan siirtymiset. Vuonna 1957 olivat edellisenä vuonna ilmenneiden puutteiden lisäksi (paitsi mittausjakson pituus) vielä pannat katkeilleet 13 kertaa. Koko tutkimusajalta mittaushetkien tarkat kellonajat olivat jääneet merkitsemättä muistiin.

Minimi- ja maksimilämpötilojen havainnot eivät sovellu mittaustekniikkansa vuoksi (vrt. 2. 3.) selittämään välillä (t-1, t) tapahtunutta ympärys-

mitan muutosta yhtä hyvin kuin saman välin vuorokautiset minimit ja maksimit.

Maan lämpötilan ja pohjaveden suhteen pätee myös edellä esitetty, koska ne olivat välin (t-1, t) loppupisteessä mitattuja arvoja. Niissä virheen mahdollisuus on kuitenkin pienempi, koska ne muuttuvat ilman lämpötilaa hitaammin.

Aineiston keruun yhteydessä mittaamatta jätetyistä muuttujista kokonaissäteily, auringonpaiste, tuulen nopeus ja vuorokautinen keskilämpötila ovat laajoilla alueilla samat, joten niiden korvaaminen lähistöllä olevien sääasemien havainnoilla aiheuttanee vain vähäisen virheen analyysissä. Sen sijaan suhteellinen kosteus on luonteeltaan paikallisempi, joten sen korvaaminen Hyytiälän havainnoilla saattaa aiheuttaa melkoista virhettä.

Puista tehdyissä pantamittauksissa ei graafisten kuvaajien perusteella ole havaittavissa suuria virheitä. Sen sijaan epätasaiset mittausvälit aiheuttavat melkoisesti vaikeutta, josta kuitenkin selvitään sopivalla muunnoksella.

Puutteistaan huolimatta aineistoa voidaan käyttää, kun se rajoitetaan käsittämään vuodet 1958—1964. Perustana olevan otanta-asetelman ja puiden poistamisen vuoksi on oltava hyvin varovainen tulosten yleistämisessä.

3. TUTKIMUKSEN RAJOITTAMINEN JA TÄSMENTÄMINEN

3.1. Rajoittaminen osa-aineistoon

Aineiston muodostavat vuosina 1958—64 vuoden 1964 otanta-asetelman mukaan mitatut 15 624 havaintovektoria (u_{ijt}, x_{ijt}), joissa u_{ijt} (skalaari) on kuusen i pantalukema vuotena j hetkellä t ja x_{ijt} on u_{ijt}:tä vastaava $(1 \times m)$ — kasvutekijävektori.

Tutkimus rajoitetaan koskemaan vain aineiston käyttökelpoista osaa (vv. 1958—1964). Rajoittumista kuusiaineistoon voidaan perustella sillä, että kyseessä olevat kolme puulajia muodostavat selvästi omat biologiset populaationsa. Lisäksi kuusella on havaittavissa selvästi voimakkaampi kasvureaktio kuin muilla puulajeilla, joten mahdollisuus tilastollisen säännönmukaisuuden peittymiseen mittausvirheisiin on sillä pienin.

Mallien laatiminen ja testaaminen kuusiaineistolla voidaan suorittaa siten, että jonkun koealan aineistosta lasketaan erilaisia malleja, ja sen jälkeen parhaiten selittäviä malleja sovelletaan erikseen muiden koealojen aineistoihin (C o c h r a n 1963). Sitten voidaan testata, poikkeavatko samanrakenteisella mallilla saadut regressiokertoimet toisistaan eri koealoilla (R a o 1965) sekä verrata eri mallien selitysasteita. Jos testauksessa ei ilmene merkitseviä eroja (pääluokka $\times$ ravinteisuusluokka) — solujen sisällä, voidaan samassa solussa olevien koealojen aineistot yhdistää, jolloin saadaan kvalitatiiviset muuttujat, joita pää- ja ravinteisuusluokat ilmentävät.

3.2. Tutkimuksen päämäärä

Koetta aloitettaessa v. 1956 olivat tiedot kasvuun vaikuttavista tekijöistä erittäin puutteellisia. Perustetulla kokeella oli tarkoituksena selvittää kasvun vaihtelun riippuvuus seuraavista tekijöistä:

1. Kosteuden vaihtelut (ilmassa ja maassa)
2. Lämpötilan vaihtelut (ilmassa ja maassa)
3. Ojitustehon vaihtelut
4. Lannoitus

Kyseessä olevan kokeen perustamisen jälkeen tehdyissä kokeissa (H u i k a r i ja P a a r l a h t i 1967) saatiin valaistusta kohtiin 3. ja 4. Muovihuone- ja kylmennyskokeiden perusteella voitiin päätellä, että edellisen kasvukauden kasvun loppumisen jälkeisen ajan sääolot saattavat vaikuttaa seuraavan kasvukauden kasvuun (Huikarin akkumulaatioteoria, H u i k a r i 1967). Näin ollen voidaan muuttaa tutkimuksen alkuperäistä päämäärää siten, että pyritään erityisesti selvittämään kasvun vaihtelun riippuvuus seuraavista tekijöistä:

1. Kosteuden vaihteluista (ilmassa ja maassa)
2. Lämpötilan vaihteluista (ilmassa ja maassa)
3. Edellisen syksyn sääoloista
4. Saman vuoden käpysadosta

Silloin taulukossa 2 esiintyvät kiinteät tai hitaasti muuttuvat tekijät[1]) otetaan analyysiin mukaan ensisijaisesti niiden vaikutuksen eliminoimiseksi, jolloin mielenkiintoisempien tekijäin vaikutukset saadaan esille selvemmin.

[1]) Etäisyys ojasta, turpeen paksuus, metsikön tiheys, taloudellinen ikä ja puun paksuus.

4. PERUSMUUNNOKSET

Ennen varsinaista analysointia aikasarjoja muunnettiin siten, että ne tulivat keskenään vertailukelpoisiksi.

Pantalukemista laskettiin erotukset, jolloin peräkkäisten havaintojen riippuvuus toisistaan väheni (K e n d a l l & S t u a r t 1968). Näin päästiin kunkin puuyksilön ympärysmitan muutoksiin kullakin mittausvälillä (t-1, t). Koska mittausvälit olivat eri pituisia, siirryttiin mittausvälin puukohtaisiin keskimääräisiin vuorokautisiin ympärysmitan muutoksiin. Ne saatiin kaavasta

$$y_{ijv} = \frac{u_{ijt-1} - u_{ijt}}{\Delta t},$$

jossa $t-1 < v \leq t$, u_{ijt-1} ja u_{ijt} ovat puun i ja vuoden j peräkkäisiä pantalukemia sekä Δt on välin ($t-1$, t) pituus vuorokausissa.

Kasvutekijäin aikasarjoista ilman minimi- ja maksimilämpötila, maan lämpötila 5 ja 20 cm:n syvyydellä sekä pohjaveden syvyys muunnettiin käyttämällä kaavaa

$$x_{jkv}^{(h)} = \frac{x_{jkt-1}^{(h)} + x_{jkt}^{(h)}}{2},$$

jossa $t-1 < v \leq t$, sekä $x_{jkt}^{(h)}$:t ovat kasvutekijän h vuotena j koealalla k saamat peräkkäiset arvot. Lisäksi laskettiin kaikkien alueella olleiden minimi- ja maksimimittareiden muunnettujen arvojen kunkin havaintokerran aritmeettiset keskiarvot eli

$$\overline{x}_{j.v}^{(h)} = \frac{\sum_{k=1}^{q_h} x_{jkv}^{(h)}}{q_h},$$

jossa q_h on muuttujaa h mitanneiden mittareiden lukumäärä.

Tällaisilla muunnoksilla kyseiset aikasarjat tasoittuvat jonkin verran, mutta siitä huolimatta varsinkin maan lämpötiloissa ja pohjaveden syvyydessä päästään luotettavampiin arvoihin kyseessä olevalla mittausvälillä. Tätä voidaan perustella seuraavasti. Ensiksi mahdollinen viive kasvutekijäin vaikutuksessa kasvuun tulee jossain määrin otetuksi huomioon. Toiseksi

maan lämpötilojen ja pohjaveden syvyyden sarjoissa muutokset ovat hitaita, joten muunnoksella saatavat arvot vastaavat melko hyvin kyseessä olevan mittausvälin päivittäisiä keskiarvoja. Sen sijaan ilman lämpötilan minimissä ja maksimissa muutos saattaa aiheuttaa melkoisia virheitä, koska nämä muuttujat vaihtelevat voimakkaasti (varsinkin maksimi).

Koska sade oli mittausvälin kertymäarvo, niin sen kyseessä olevan mittausvälin päivittäinen keskiarvo saatiin jakamalla havaintoarvo mittausvälin pituudella. Sen jälkeen laskettiin kaikkien alueella olleiden sademittareiden kunkin havaintokerran aritmeettinen keskiarvo.

Auringonpaisteen ja kokonaissäteilyn päivittäiset määrät[1]) laskettiin kullakin mittausvälillä yhteen ja jaettiin välin pituudella, jolloin päästiin kyseessä olevan mittausvälin keskimääräisiin päivittäisiin arvoihin.

Koska tarkkoja mittausaikoja ei ole tiedossa eikä ilman suhteellisia kosteuksia ole saatavissa kuin klo 8.00, 14.00 ja 20.00 on yritetty löytää kullekin mittauspäivälle sopiva keskimääräinen ilman suhteellinen kosteus. Koska mittaukset suoritettiin klo 7.00:n ja 16.00:n välillä voitiin käyttää klo 8.00 ja 14.00 mitattujen arvojen aritmeettista keskiarvoa.

Vuorokautiset keskilämpötilat laskettiin Kolkin kaavoilla (K o l k k i ja R o s s i 1957), joten loka-helmikuussa keskiarvot saatiin kaavasta

$$M = 0.20\,(2t_8 + t_{12} + 2t_{20}) + \Delta,$$

jossa Δ (vaihtelee 0.01:n ja —0.06:n välillä) on keskimääräinen korjaustermi, ja t_i on alaviitan osoittaman kelloajan lämpötila. Muina kuukausina keskiarvot saatiin kaavasta

$$M = 0.25(t_8 + t_{14} + 2t_{20}) + a(t_{20} - t_{n,\,8}) + 0.10,$$

jossa $t_{n,\,8}$ on minimilämpötila klo 20.00—8.00 välisenä aikana, ja a on vakio, joka on välillä (—0.237, —0.114).

Taloudellinen ikä rinnan korkeudelta määritettiin I l v e s s a l o n (1965) mukaan. Silloin ennen ojitusta tapahtunut koko sädekasvu r_e jaettiin ojituksen jälkeisellä keskimääräisellä vuosittaisella sädekasvulla r_j/n_j ja osamäärä lisättiin ojituksesta vuoteen 1958 asti kuluneeseen aikaan n_j, jolloin taloudellinen ikä saadaan kaavasta

$$I_t = \frac{n_j r_e}{r_j} + n_j.$$

Kasvukautta edeltäneen syksyn säätiedoista laskettiin kasvun loppumisen jälkeiset 0 °C ja 5 °C ylittävien päivittäisten keskilämpötilojen M_l ja M_k summat kullekin puulle

[1]) Päivittäiset summat saatiin valmiiksi laskettuina Suomen Meteorologisesta Vuosikirjasta, nide 57—60, osa 4.

$$T_{io}+ = \sum_{l=1}^{n_i} M_l \qquad (M_l > 0°\text{C ja } i \text{ on puun indeksi})$$

ja

$$T_{i5}+ = \sum_{k=1}^{m_i} M_k, \qquad (M_k > 5°\text{C}),$$

jossa n_i ja m_i ovat vuorokausien lukumäärät kyseisissä summissa. Kasvun loppumisen ajankohta määritettiin likiarvona graafisista kuvaajista. Kummassakin lämpösummassa esiintyviltä vuorokausilta laskettiin myös kokonaissäteilysummat. $T_{io}+$:n kokeilu perustui P a a r l a h d e n julkaisemattomaan tutkimukseen ja $T_{i5}+$:n kokeilu mm. S a r v a k s e n (1966) tutkimukseen.

5. KASVUMALLIN MUODOSTAMINEN

5.1. Kasvuprosessin luonne

Kasvuprosessi muodostuu yhteyttämisestä (J o n s s o n 1969) ja yhteyttämistuotteiden käytöstä solujen muodostamiseen. Havaittava kasvu riippuu pääasiassa nettoyhteyttämisestä (= kokonaisyhteyttäminen — hengitys), sillä mineraali- ym. elementit muodostavat vain pienen osan kasvun massasta (L e d i g & P e r r y 1969). Yhteyttäminen riippuu paitsi ulkoisista tekijöistä myös puun sisäisistä ominaisuuksista. Sisäiset ominaisuudet ovat puuyksilöissä lähes muuttumattomia. Mutta ulkoiset kasvutekijät voivat muuttaa niiden kykyä vaikuttaa luontaisesti muotoutuvaan yhteyttämisprosessiin.

Sisäiset ja ulkoiset kasvutekijät yhdessä säätävät nettoyhteyttämisen suuruuden (J o n s s o n 1969). Hetkellä t voidaan nettoyhteyttäminen $a(t)$ esittää yhtälöllä

$$a(t) = g_1(I(t),\ J(t),\ K(t)), \tag{1.}$$

jossa

- $I(t)$ on sisäisten kasvutekijäin vektori
- $J(t)$ on ulkoisten maaperätekijäin vektori
- $K(t)$ on ulkoisten ilmastotekijäin vektori
- $g_1(\cdot)$ on $I(t)$:n, $J(t)$:n ja $K(t)$:n funktio

Jos $A(t)$ on puuhun hetkellä t varastoitunut yhteyttämistuotteiden kokonaismäärä, voidaan puun kasvunopeus hetkellä t esittää muodossa

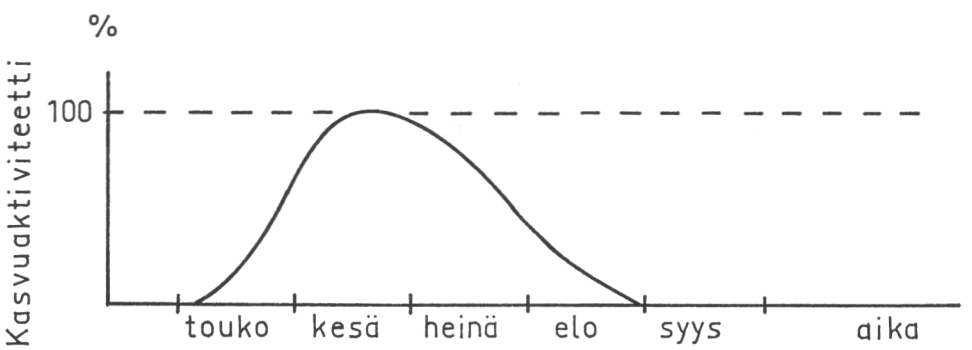
$$u(t) = g_2(I(t),\ J(t),\ K(t),\ \mathrm{A}(t)), \tag{2.}$$

jossa $g_2(\cdot)$ on $I(t)$:n, $J(t)$:n, $K(t)$:n ja $A(t)$:n funktio. Jos aikaväli yhteyttämistapahtuman ja edelleen yhteyttämistuotteiden käytön solujen muodostamiseen välillä on hyvin pieni, voidaan yhtälö (2.) esittää muodossa

$$u(t) = g_1(I(t),\ J(t),\ K(t)). \tag{3.}$$

Huikarin suorittamien kasvualusten kylmennyskokeiden (H u i k a r i 1961) perusteella voidaan päätellä, että kasvu voi alkaa keväällä, jo maan ollessa jäässä, kunhan tietty ilman lämpösumma ja lämpötila saavutetaan, ja jatkua melkein normaalina koko kasvukauden ajan heikentyen vasta seuraavana kasvukautena. Vararavinto-oletus on siis tämän perusteella järkevä.

Ulkoiset kasvutekijät voivat muuttaa puun sisäistä kasvua säätelevää mekanismia yksittäisen kasvukauden aikana ja koko puun elinaikana siten, että kasvu ei seuraa kasvutekijäin muutoksia aina yhtä voimakkaasti, vaan kasvutekijäin vaikutusfunktioiden parametrit ovat esimerkiksi puun taloudellisen iän funktioita. Potentiaalisen kasvukauden aikana ulkoisten tekijäin vaikutukset voidaan ajatella impulsseiksi, joihin sisäiset tekijät reagoivat. Keväällä kasvun alkamisen edellytyksenä on puun lepotilan purkautuminen[1]). Jos purkautumisnopeus olisi hyvin suuri, ja ulkoiset tekijät olisivat suotuisat, voisi kasvu alkaa räjähdysmäisesti. J o n s s o niin (1969) ja havaintokäyriin perustuen voidaan olettaa, että purkautumisnopeus lisääntyy erääseen hetkeen asti, jonka jälkeen se vähenee saavuttaen eräänä hetkenä nolla-arvon, jolloin kasvuaktiviteetti on maksimissaan. Lisäksi voidaan olettaa, että kasvuaktiviteetti ei ole kauan maksimissaan, vaan lepokauteen valmistautuminen alkaa. Tällöin palautumisnopeus lisääntyy erääseen hetkeen asti, jonka jälkeen se vähenee saavuttaen nolla-arvon. Silloin kasvuaktiviteetti on nollassa, ja lepotila on täydellinen[2]) (vrt. kuva 4). Edellä kuvailtuun tapahtumaan vaikuttanee myös puun varhainen menneisyys, koska sen aikana ovat sisäiset ominaisuudet olleet ulkoisten kasvutekijöiden vaikutusten alaisina.



Kuva 4. Kasvuaktiviteetin kuvaajan eräs mahdollinen muoto.

[1]) Lepotilan purkautumis- ja palautumisprosessi muodostaa kasvuaktiviteetin.
[2]) On mahdollista, että puu ei saavuta täydellistä lepotilaa lainkaan.

5.2. Ympärysmitan kasvumallit

5.2.1. Yleistä

Tässä tutkimuksessa valittiin kasvua edustavaksi muuttujaksi puun ympärysmitan kasvu, josta tehtiin havaintoja kuten kappaleessa 2.3. on selostettu. Näistä havainnoista saadut (vrt. kappale 4) ympärysmitan keskimääräisten vuorokautisten muutosten voidaan olettaa muodostuneen seuraavista komponenteista

— autonominen kasvu
— kasvun vaihtelu
— hydrostaattinen vaihtelu
— satunnaisvirhe (sisältää mm. mittausvirheen)

Autonomiseen kasvuun vaikuttavat puun sisäiset tekijät (vrt. 5.1.), joita ei ole mitattu eikä oletettavasti pystytä mittaamaankaan. Staattisessa mallissa tämän komponentin osuus havaintoarvosta voidaan selittää ajan, taloudellisen iän ja paksuuden funktioilla. Aika on helpoimmin käsiteltävissä seuraavan muotoisena muuttujana

(1.) t = aika edellisestä kevätpäiväntasauksesta, jolloin kevätpäivän tasauspäivä saa arvon nolla.

Dynaamisessa mallissa annetaan sisäisten muutosten vaikuttaa malliparametreihin, jolloin aikaa ei tarvita mallissa eksplisiittisessä muodossa[1]).

Kasvun vaihtelu aiheutuu lyhytaikaisista kasvutekijöiden muutoksista, joten sen osuuden selittämiseen käytetään mitattuja kasvutekijöitä. Staattisessa tapauksessa tämän komponentin selittämiseen tarvittavat malliparametrit oletetaan vakioiksi, kun taas dynaamisessa tapauksessa ne ovat muuttujia.

Hydrostaattinen vaihtelu aiheutuu mekaanisesta turpoamis- ja kutistumisprosessista, joka on oletettavasti kosteuden muutoksiin nopeasti reagoiva ilmiö. Näin ollen sen selittämiseen voidaan käyttää mittauspäivänä ennen mittausta rekisteröityjä suhteellisen kosteuden ja lämpötilan arvoja. Tällöin selitetään mahdollisimman vähän kasvunvaihtelua hydrostaattisen vaihtelun mukana, sillä selitettävän muuttujan mittausarvoon aikaisempien vuorokausien aikana muodostuneessa lisäyksessä ei ole oletettavasti turpoamisvaikutusta jäljellä, ja mittauspäivän aikana ennen mittaushetkeä ehtii kasvua tapahtua vähän, koska esim. K r a m e r in ja K o z l o w s k in (1960) mukaan pääosa kasvusta tapahtuu yön aikana, ja L e i k o l an (1969) mukaan paksuuden vaihtelu puun rungossa seuraa nopeasti kosteuden vaihteluita.

[1]) Tässä tutkimuksessa rajoitutaan staattisiin malleihin.

Satunnaisvirheeseen kuuluvat mittausvirheet ja muut epäsäännöllisyydet, joita ei kyetä erittelemään. Selitettävän muuttujan muuntamisesta aiheutuva satunnaisvirheen tarpeeton painotus on selitettävä käyttämällä selitysmallissa selittäjänä sopivaa mittausvälin pituuden funktiota. Tarpeeton painotus tarkoittaa sitä, että kunkin mittausvälin havaintoarvo on jaettu mittausvälin pituudella, jolloin myös mukana oleva satunnaiskomponenttikin on tullut jaetuksi vastaavalla luvulla, vaikka se tuskin on verrannollinen mittausvälin pituuteen.

Tässä tutkimuksessa käytettiin 5.1.(2.):ssa esiintyvälle funktiolle $g_2(\cdot)$ muotoa

$$(2.) \qquad \text{ø}(x_1(t),\ x_2(t),\ \ldots,\ x_m(t)),$$

jossa perusmuunnetut muuttujat (vrt. taulukko 3) $x_i(t)$ edustivat $g_2(\cdot)$:n argumenttivektoreita seuraavasti

— $\{x_2(t),\ x_3(t),\ x_{18},\ x_{22}(t)\} \subset I(t)$

— $\{x_1(t),\ x_{12}(t),\ x_{13}\} \subset J(t)$

— $\{x_4(t),\ x_5(t),\ x_6(t),\ x_7(t),\ x_8(t),\ x_9(t),\ x_{10}(t),\ x_{11}(t),\ x_{19}(t),\ x_{20}(t),\ x_{23}(t)\} \subset K(t)$

— $\{x_{14}(t),\ x_{15}(t),\ x_{16}(t),\ x_{17}(t)\} \subset A(t)$

(Lisäksi ø $(\cdot)$:ssä oli muunnostekniikasta johtuva korjausmuuttuja x_{21}.) Funktiolle $u(t)$ käytettiin vastaavasti perusmuunnettua muuttujaa $\underline{y}_{ijv}$ muodossa $\underline{y}(t)$.

Silloin saatiin mittausvälin keskimääräinen kasvu välin keskipisteessä (kun v:lle annettiin välin $(t—1,\ t)$ keskipisteen arvo) mallilla

$$(3.) \qquad \underline{y}(t) = \text{ø}(x_1(t),\ x_2(t),\ \ldots,\ x_m(t)) + \underline{\varepsilon},\ m = 23.$$

Malleja koealoittain laskettaessa oletetaan, että kasvualusta on joko homogeeninen tai muutokset voidaan selittää kvantitatiivisilla muuttujilla.

5.2.2. Kvadraattinen malli

Olkoon $\underline{y}$:n ja $\{x_j\}$:n [1] (x_j:t perusmuunnettuja kvantitatiivisia muuttujia) välinen malli yleistä muotoa

$$(1.) \qquad \underline{y} = \text{ø}(x_1,\ \ldots,\ x_m) + \underline{\varepsilon}\ (\underline{\varepsilon} \text{ on satunnaisvirhe}).$$

[1]) $\{x_j\}$:ssä on sekä sellaisia muuttujia, joiden elementit ovat kiinteät että muuttujia, jotka ovat y:n tavoin satunnaismuuttujia. Nämä satunnaismuuttujat otetaan ehdollisina $\underline{x}_{tj} = x_{tj}$.

Jos malli (1.) voidaan kirjoittaa muotoon

$$(2.)\quad \underline{y} = \beta_o + \beta_1 x_1 + \ldots + \beta_m x_m + \beta_{11} x_1^2 + \ldots + \beta_{mm} x_m^2 + \beta_{12} x_1 x_2 + \ldots + \beta_{ij} x_i x_j + \ldots + \beta_{m-1,\,m} x_{m-1} x_m + \underline{\varepsilon} = \beta_o + \sum_{i=1}^{m} \beta_i x_i + \sum_{i=1}^{m} \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i<j}^{m} \beta_{ij} x_i x_j + \underline{\varepsilon},$$

sanotaan sitä kvadraattiseksi malliksi (C o c h r a n & C o x 1957).

Kun $\varphi(x_1, \ldots, x_m)$:n tarkkaa muotoa ei tunneta, voidaan käyttää kvadraattista mallia. Se antaa hyvän likiarvon useille monimutkaisillekin malleille (V ä l i a h o 1964). Malliparametrien estimoiminen edellyttää, että jokainen x_j saa vähintään kolme eri suurta arvoa. Kvadraattisen mallin haittana on selittävien muuttujien lukumäärän l nopea kasvaminen selittäjäjoukon $\{x_j\}$ vähäisenkin laajentumisen vuoksi, sillä l saadaan yhtälöstä

$$(3.)\quad l = m + \tfrac{1}{2}m(m+1).$$

Mallista jouduttiin tekemään epätäydellinen, koska $\{x_j\}$:n kuului 23 muuttujaa. Näiden muuttujien joukossa oli aika mukana (A n d e r s o n 1954, F r i s c h & W a u g h 1933) muodossa 5.2.1 (1.). Se esittää mittausvälin keskipisteen ajallisen etäisyyden kevätpäivän tasauksesta. Mallissa olleet muuttujayhdistelmät esitetään taulukossa 3. Lisäksi käytettiin mallia

$$(4.)\quad \underline{y} = \beta_o + \sum_{j=1}^{m} \beta_j x_j + \sum_{j=1}^{m} \beta_{jj} x_j^2 + \underline{\varepsilon},$$

joka saatiin (2.):stä jättämällä ristitulo-osa pois.

Kvadraattinen malli voi antaa huonon likiarvon, jos $\varphi(x_1, \ldots, x_m)$ lähestyy jotain asymptoottitasoa $\{x_j\}$:n arvojen pienentyessä ja kasvaessa. Varsinkin ennustamisessa voidaan silloin joutua harhateille.

5.2.3. Kerrannainen malli

Koska kvadraattisessa mallissa on kohdassa 5.5.2. mainittuja heikkouksia, haluttiin aineistoa analysoida myös kerrannaisella mallilla, jolloin yleisen mallin 5.2.2. (1.) oletettiin olevan muotoa

$$(1.)\quad \underline{y} = \varphi(x_1, \ldots, x_m) e^{\underline{\varepsilon}} = f_1(x_1) f_2(x_2) \ldots f_m(x_m)\, e^{\underline{\varepsilon}} = \left(\prod_{j=1}^{m} f_j(x_j) \right) e^{\underline{\varepsilon}},$$

jossa $f_j(x_j)$ on perusmuunnetun muuttujan vaikutusfunktio, e Neperin luku ja $\underline{\varepsilon}$ satunnaisvirhe. Tässä aika otettiin muuttujaksi muodossa 5.2.1.(1.). Kerrannaisen perusmallityypin käytön kasvutapahtuman selittämiseen on B a u l e perustellut v. 1917 (B a u l e 1917).

Taulukko 3. Perusmuunnetut (eräistä lisämuunnoksia) muuttujat, niiden keskiarvot ja hajonnat. Tähdillä merkityt muuttujat olivat mukana laskettaessa kvadraattista regressiomallia koealan 21 aineistolle. Numerot eräissä soluissa ovat sellaisten muuttujien korrelaatiokertoimet y:n kanssa, jotka jätettiin pois analyysistä korrelaatiomatriisin laskennan jälkeen. Solu $x_i x_j$ tarkoittaa muuttujien x_i ja x_j, i, j = 1, . . ., 23, ristitulotermiä.

	y	x_0	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}	x_{11}	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{15}	x_{16}	x_{17}	x_{18}	x_{19}	x_{20}	x_{21}	x_{22}	x_{23}	Keskiarvo	Hajonta
Ympärysmitan muutos ..... y																									.123	.133
$x_0 \equiv 1$		*																								
Puun etäisyys ojasta ..... x_1		*	*																						55.7	5.6
Puun taloudellinen ikä ..... x_2		*		*																					53.4	2.9
Puun paksuus ..... x_3		*		*	*																				15.1928	3.1857
Sade ..... x_4		*				*																			1.8	2.3
Pohjavesi ..... x_5		*	*			.018	*																		44.2	20.6
Ilman minimi lämpötila ..... x_6		*						*																	2.4	3.9
Ilman maksimi lämpötila ..... x_7		*							*																21.9	4.5
Keskilämpötila (mittaus-vrk)/mittausväli . x_8		*								*															3.5	1.5
Tuulen nopeus ..... x_9		*	*		*	*					*														3.6	.9
Kokonaissäteily ..... x_{10}		*				*	*	*	*			*													407.7	124.1
Auringon paiste ..... x_{11}		*					*		*			*	*												7.6	3.3
Maan lämpötila 5 cm:n syvyydessä ..... x_{12}		*					*	*	*		*			*											9.2	3.3
Maan lämpötila 20 cm:n syvyydessä ..... x_{13}		*					*	*							*										8.0	3.1
$m_i T_{i5+}$ ..... x_{14}		*														*									8474.3	4480.9
$n_i T_{i0+}$ ..... x_{15}		*															*								31666.8	13137.2
$m_i \Sigma$ kokonaissäteily (T_{i5+}) ..... x_{16}		*																*							31052.4	18770.8
$n_i \Sigma$ kokonaissäteily (T_{i0+}) ..... x_{17}		*																	*						582484.0	259508.0
Käpyjen runsaus ..... x_{18}		*				.073	-.006									*	*	*	*	*					44.6	21.1
Suht. kosteus mittausvälillä ..... x_{19}		*				.049	-.019	*	*			*	*	*	.036						*				70.1	12.6
Suht. kosteus mittauspäivänä/mittausväli x_{20}		*								*												*			17.9	5.9
Mittausväli ..... x_{21}		*																					*		4.4	2.8
Aika kpt:stä ..... x_{22}		*	*	*	*		*	*	*		*	*		*	*	*	*	*	*	*	*	-.001	*	*		110.1	36.2
$x_7 - x_6$ ..... x_{23}						*	*		*		*									-.036	*			*	*	19.5	3.9

Malli (1.) on logaritmoimalla linearisoitavissa, jos

$$(2.) \qquad \underline{y} > 0 \text{ ja } f_j(x_j) > 0,\ j = 1, \ldots, m.$$

Silloin se saadaan muotoon[1])

$$(3.) \qquad \ln\underline{y} = \ln f_1(x_1) + \ln f_2(x_2) + \ldots + \ln f_m(x_m) + \underline{\varepsilon} = \sum_{j=1}^{m} \ln f_j(x_j) + \underline{\varepsilon}.$$

Kun perusmuunnettua ympärysmitan muutosta käytetään kasvua osoittavana muuttujana, voi oletus (2.) olla virheellinen. Näin tapahtuu, kun kasvu jostakin syystä eräällä aikavälillä on pysähdyksissä, tai puunrungossa tapahtuu voimakkaita hydrostaattisia muutoksia, jotka aiheuttavat rungon kutistumisen. Edellisessä tapauksessa y:n arvo on nolla ja jälkimmäisessä pienempi kuin nolla. Edellä mainitun tilanteen välttämiseksi yhdistettiin mittausvälejä tarpeellinen määrä ennen perusmuunnosten tekoa. Kaikissa myöhemmin esitettävissä malleissa kokeiltiin edellä esitetyn lisäyksen jälkeen perusmuunnetusta ympärysmitan muunnoksesta muunnosta

$$(4.) \qquad z = \ln y.$$

Kerrannaiseen perusmalliin (3.) sijoitettiin kasvutekijöille erilaisia vaikutusfunktioita, joita kasvun oletettiin seuraavan. Vaikutusfunktiot ja niiden logaritmiset muodot oletettiin seuraaviksi:

$a_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j e^{\beta_j(x_j-\gamma_j)^2}$

$a_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \beta_j x_j^2 - 2\beta_j\gamma_j x_j + \beta_j\gamma_j^2 =$ [2])
$\sigma_j^o + \omega_j^o x_j + \beta_j x_j^2$ $(\sigma_j^o = \alpha_j^o + \beta_j\gamma_j^2,\ \omega_j^o = -2\beta_j\gamma_i)$

$b_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j e^{\delta_j x_j^2}$

$b_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \delta_j x_j^2$

$c_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j e^{\lambda_j x_j}$

$c_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \lambda_j x_j$

$d_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j x_j^{\eta_j}$

$d_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \eta_j \ln x_j$

$e_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j x_j^{\eta_j} e^{\lambda_j x_j}$

$e_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \lambda_j x_j + \eta_j \ln x_j$

$g_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j e^{\psi_j x_j^{-1}}$

$g_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \psi_j x_j^{-1}$

[1]) Jos $\ln f_j(x_j)$ on parametrien suhteen lineaarinen, kaikilla j voidaan estimointi suorittaa lineaaristen mallien teoriaa hyväksi käyttäen.

[2]) $\alpha_j^o = \ln\alpha_j$ jokaisessa yhtälössä.

$h_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j(x_j + \varkappa_j)^{\xi_j} e^{\varrho_j(x_j+\varkappa_j)}$

$h_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \xi_j \ln(x_j + \varkappa_j) + \varrho_j(x_j + \varkappa_j)$ [1])

$i_1)$ $f_j(x_j) = \alpha_j e^{\varrho_j}(x_j + \varkappa_j)^{-1}$

$i_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \varrho_j(x_j + \varkappa_j)^{-1}$ [1])

$k_1)$
$$\begin{cases} f_j(x_j) = \alpha_j(x_j - \tau_j)^{\nu_j}(\Delta_j - x_j)^{\mu_j} \\ f_j(x_j) \neq 0, \text{ kun } \tau_j < x_j < \Delta_j \\ f_j(x_j) = 0, \text{ kun } \tau_j \geq x_j \text{ tai } x_j \geq \Delta_j \end{cases}$$

$k_2)$ $\ln f_j(x_j) = \alpha_j^o + \nu_j \ln(x_j - \tau_j) + \mu_j \ln(\Delta_j - x_j)$ [1]), kun $f_j(x_j) \neq 0$.

Tutkimuksessa testattiin kerrannaisia malleja, joissa oli seuraavanlaisia vaikutusfunktioyhdistelmiä:

(5.) $\{a_1, b_1, c_1\}$, a_1:ssä $j = 4, 5, 6, 11, 12, 13, 22$
b_1:ssä $j = 7, 10, 19$
c_1:ssä $j = 1, 2, 3, 15, 17, 18, 20, 21$

(6.) $\{a_1, c_1, d_1\}$, a_1:ssä $j = 4, 5, 6, 11, 12, 13, 22$
c_1:ssä $j = 1, 2, 3, 18, 20, 21, 23$
d_1:ssä $j = 14, 15, 16, 17$

(7.) $\{a_1, c_1, g_1\}$, a_1:ssä $j = 5, 6, 11, 12, 13, 22, 23$
c_1:ssä $j = 1, 2, 3, 4, 18, 21$
g_1:ssä $j = 7, 8, 9, 10, 14, 15, 16, 17, 19, 20$

(8.) $\{a_1, b_1, c_1, d_1, e_1, g_1, h_1, i_1, k_1\}$,
a_1:ssä $j = 1, \ldots, m$
b_1:ssä $j = 1, \ldots, m$
c_1:ssä $j = 1, \ldots, m$
d_1:ssä $j = 3, 14, 15, 16, 17$
e_1:ssä $j = 3, 14, 15, 16, 17$
g_1:ssä $j = 1, 8, 14, 15, 16, 17, 19, 20$
h_1:ssä $j = 6, 7, 10, 12, 13, 22$
i_1:ssä j = 6, 7, 10, 12, 13, 22
k_1:ssä $j = 22$

Joukossa (8.) on lukuisia kombinaatiomahdollisuuksia. Näin ollen on suoritettu valintaa eri yhdistelmien välillä.

[1]) Kun kysymyksessä oleva vaikutusfunktio sijoitetaan (3.):een, saadaan parametrien suhteen epälineaarinen malli. Silloin on analyysissä kokeiltu epälineaarisuuden aiheuttavaan parametriin erilaisia arvoja (vrt. taulukko 4) ja sen jälkeen laskettu malli lineaaristen mallien teoriaa hyväksi käyttäen. Parempaan tulokseen päästäisiin linearisoimalla mallit Taylorin sarjakehitelmällä ja sen jälkeen käyttämällä iteroivaa laskumenetelmää (Draper & Smith 1966).

6. ANALYYSIMENETELMÄ

6.1. Yleinen lineaarinen regressiomalli

Yleinen lineaarinen regressiomalli on muotoa

$$\underline{y} = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \cdots + \beta_k x_k + \underline{\varepsilon},$$

jossa $\underline{y}$ on selitettävä muuttuja, x_j:t selittäjiä, β_j:t regressiokertoimia ja $\underline{\varepsilon}$ on satunnaisvirhe ($j = 1, \ldots, k$). Matriisimerkinnöin malli voidaan kirjoittaa muotoon

$$\underline{y} = X\beta + \underline{\varepsilon}, \tag{1.}$$

jossa

- $\underline{y}$ on $(n \times 1)$ — vektori
- X on $(n \times k)$ — matriisi
- β on regressiokerrointen $(k \times 1)$ — vektori
- $\underline{\varepsilon}$ on $(n \times 1)$ — virhevektori

Yleisesti oletetaan vain X:n sarakkeiden lineaarinen riippumattomuus (V ä l i a h o 1969). Mutta tarvittaessa voidaan tehdä seuraavia lisäoletuksia

1° X (annettu) on ei-stokastinen [1])
2° $\underline{y}$ (havaittu) on stokastinen
3° β (tuntematon) on ei-stokastinen
4° $\underline{\varepsilon}$ (tuntematon) on stokastinen
5° $E(\underline{\varepsilon}) = 0$
6° $E(\underline{\varepsilon}\underline{\varepsilon}') = \sigma^2 I$ (σ_2^2 on virhevarianssi)
7° $\underline{\varepsilon}_t \sim N(0, \sigma^2)$, $t = 1, 2, \ldots, n$.

Regressiokertoimet voidaan estimoida pienimmän neliösumman (pns-) menetelmällä, jolloin β:n pns-estimaattori $\underline{\hat{\beta}}$ määrätään siten, että jäännösneliösumma

[1]) Kun X on stokastinen, voidaan tapaus palauttaa ei-stokastiseksi, kun tarkastelut tehdään ehdollisina siten, että $\underline{x}_{tj} = x_{tj}$ jokaisella t ja j. Lukujen x_{tj} syntymistapa on vapaa, mutta se vaikuttaa β_j:n estimaattoreiden ominaisuuksiin, sillä kun x_{tj}:t on kiinnitetty, niitä pidetään mallin osina. Testattaessa hypoteesia $H_o: R\beta = c$ (hypoteesia $H_1: R\beta = c$ vastaan), voidaan menetellä kuten ei-stokastisessa tapauksessa.

(2.) $$\underline{q} = \underline{e}'\underline{e} = (\underline{y} - X\underline{\hat{\beta}})'(\underline{y} - X\underline{\hat{\beta}})$$

tulee minimiksi. Silloin saadaan

(3.) $$\underline{\hat{\beta}} = (X'X)^{-1}X'\underline{y}$$

(4.) $$\underline{e} = \underline{y} - X\underline{\hat{\beta}} = (I - X(X'X)^{-1}X')\underline{y}$$

(5.) $$\underline{q} = \underline{e}'\underline{e} = \underline{y}'(I - X(X'X)^{-1}X')\underline{y}.$$

Yhtälöitä (3.), (4.) ja (5.) laskettaessa tarvitaan vain X:n sarakkeiden lineaarinen riippumattomuus. Jos oletukset 1°—6° pätevät, $\underline{\hat{\beta}}$ on β:n harhaton estimaattori eli $E(\underline{\hat{\beta}}) = \beta$ ja lisäksi $E(\underline{e}) = 0$. σ^2:n harhaton estimaattori on

(6.) $$\underline{s}^2 = \frac{\underline{q}}{n-k} \; (= \text{jäännösvarianssi}).$$

Mallin (1.) lineaarisuus tarkoittaa sitä, että se on lineaarinen parametrien β_j suhteen. Siksi muuttujat $x_1, \ldots, x_k$ voidaan korvata niiden lineaarisilla funktioilla mallien menettämättä lineaarisuuttaan. Lisäksi eräitä epälineaarisia malleja voidaan linearisoida logaritmoimalla.

Jos myös oletus 7° pätee, β:n jokaiselle komponentille voidaan laskea luottamusvälit tai testata eräitä lineaarisia hypoteeseja (K e n d a l l & S t u a r t 1967). Tällöin testit ovat uskottavuussuhdetestejä. Koska $\underline{\hat{\beta}}_j$ on $\underline{y}$:n elementtien lineaarinen funktio, niin

— $E(\underline{\hat{\beta}}) = \beta$
— $D^2(\underline{\hat{\beta}}_j) = \sigma^2[(X'X)^{-1}]_{jj}$.

σ^2:n estimaattori on riippumaton β:sta, joten $(n-k)\underline{s}^2/\sigma^2$ on X^2-jakautunut vapausastein $n-k$. Silloin seuraa välittömästi, että

(7.) $$\underline{t} = (\underline{\hat{\beta}}_j - \beta)/\{\underline{s}^2[(X'X)^{-1}]_{jj}\}^{\frac{1}{2}}$$

noudattaa Studentin t-jakautumaa n-k vapausasteella. β_j:tä koskevan nollahypoteesin testaus suoritetaan vertaamalla t-arvoa halutun merkitsevyystason kynnysarvoon.

Jos mallista (1.) poistetaan selittäjät $x_1, \ldots, x_p$, saadaan uusi malli $(1.)_R$. Silloin saadaan

(8.) $$\underline{F} = \frac{(\underline{q}_R - \underline{q})/p}{\underline{q}/(n-k)},$$

joka nollahypoteesin H_o:$\beta_1 = \ldots = \beta_p = 0$ vallitessa noudattaa F i s h e r in F(p, n-k)-jakautumaa. Tällöin voidaan testata poistettujen selittäjien merkitsevyyttä mallissa (1.) vertaamalla F:n arvoa halutun merkitsevyystason kynnysarvoon.

Hypoteesin H_0:$\beta_2 = \beta_3 = \ldots = \beta_k = 0$ testaamiseksi voidaan myös muodostaa suhde

$$\underline{F} = \frac{\underline{R}^2/(k-1)}{(1-\underline{R}^2)/(n-k)}, \tag{9.}$$

jossa

$$\underline{R}^2 = 1 - \frac{n-k}{n-1}\,\frac{\underline{s}^2}{\underline{s}_y^2} \quad (\underline{s}_y^2 \text{ on selitettävä varinssi}) \tag{10.}$$

on yhteiskorrelaatiokertoimen neliö. $\underline{F}$ on hypoteesin H_0 pätiessä jakautunut kuten $F(k-1, n-k)$. Testattaessa voidaan menetellä kuten edellä (8.):ssa.

Numeeriset laskut suoritettiin valtion tietokonekeskuksessa kirjastoohjelmapakkauksella HYLP.RS, joka perustuu E f r o y m s o n i n (1961) ja H e m m e r l e n (1967) julkaisuihin.

6.2. Jäännösvirheiden tarkastelu

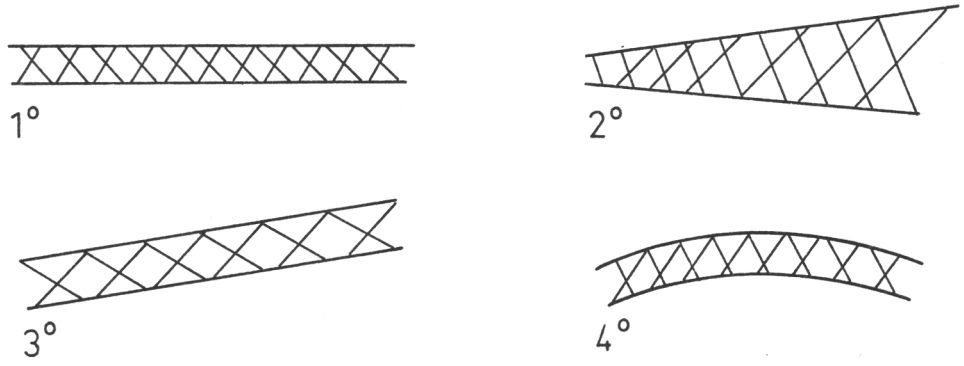
Jos hyväksytään kappaleen 6.1. oletukset 1°—7°, on tutkittava jäännöstermejä e_j oletusten paikkansapitävyyden selvittämiseksi. Seuraava esitys perustuu D r a p e r i n ja S m i t h i n (1966) julkaisuun.

Jos sovitettu malli on oikea, jäännöstermien jakauma lähestyy normaalijakaumaa, kun havaintojen lukumäärä kasvaa. Näin ollen jäännöstermien tarkastelulla voidaan selvittää, ovatko oletukset päteviä vai eivät. Oletusten pätevyydellä tarkoitetaan sitä, että aineiston perusteella ei ole syytä katsoa oletuksia vääriksi. Graafiset tarkastelut voidaan suorittaa seuraavasti:

(1) kaikki jäännöstermit asetetaan akselistoon, jossa jäännöstermimuuttuja on abskissana ja jäännöstermien lukumäärä ordinaattana
(2) jäännöstermit asetetaan akselistoon, aika abskissana ja jäännöstermimuuttuja ordinaattana, jos aika tunnetaan
(3) jäännöstermit asetetaan akselistoon $\hat{y}$ abskissana ja jäännöstermimuuttuja ordinaattana
(4) jäännöstermit asetetaan akselistoon x_j, $j = 1, 2, \ldots, k$, abskissana ja jäännöstermimuuttuja ordinaattana.

Lisäksi voidaan käyttää muitakin asiaa valaisevia kuvaamistapoja. Esimerkiksi kasvuaineistossa voidaan puukohtaiset jäännöstermit merkitä omana ryhmänään aika-akselille, ja tutkia niiden käyttäytymistä kullekin puulle erikseen.

Tapauksessa (1) kannattaa jäännösvirheet luokitella, jos aineisto on suuri. Silloin voidaan tähän luokiteltuun aineistoon sovittaa normaalijakauma (H a l d 1962), ja verrata sitä empiiriseen histogrammiin. Jos oletusten voidaan katsoa pitävän paikkansa, niin jäännösvirheiden avulla voidaan löytää myös ns. vieraat havainnot.



Kuva 5. 1° vyö x_j-akselin suuntainen ja leveys vakio. 2° vyö x_j-akselin suuntainen ja levenee tai kapenee x_j:n mukaan. 3° vyön suunta nouseva tai laskeva x_j:n suhteen ja leveys vakio. 4° vyö polymin muotoinen ja leveys vakio.

Tapauksissa (2), (3) ja (4) kuvan 5 informaatio voidaan tulkita seuraavasti:

1° mallia ei ole havaittu vääräksi
2° varianssi ei ole vakio, jolloin mallia voidaan yrittää parantaa käyttämällä painotettua menetelmää tai y:n muuntamista
3° virhe laskuissa eli x_j ei esiinny lineaarisena laskuissa
4° tarvitaan lisää termejä, esimerkiksi x_j:n neliötermi, tai y:tä on muunnettava

Kohdista 2°—4° voi esiintyä erilaisia yhdistelmiä.

Graafisten menetelmien lisäksi on johdettu joukko laskennallisia menetelmiä. Yleensä tilannetta valaisevat kuviot kuitenkin riittävät.

7. TULOKSET JA NIIDEN TARKASTELU

7.1. Empiiriset mallit

Ensimmäisenä laskettiin kvadraattiset mallit 5.2.2.(2.) ja 5.2.2.(4.). Kuten kappaleessa 5.2.2. on mainittu, (2.):sta jouduttiin jättämään osa muuttujayhdistelmistä pois. Koealan 21 aineistosta suoritetussa valikoivassa regressioanalyysissä oli 96 täysin valinnaista selittäjää sekä muuttuja x_{21} pakollisena (ei ollut merkitsevä 5 %:n tasolla) (vrt. taulukko **3**). Niistä tuli malliin mukaan 19 muuttujaa, kun nollahypoteesin, H_0:$\beta_j = 0$, $j = 1, \ldots, 96$, hylkäämisraja oli 5 %:n merkitsevyystasolla[1]). Malli sai muodon

$$
\begin{aligned}
(1.) \quad \underline{y} = &- 1.271754 + .002229x_1 + .009494x_2 + .005255x_3 + .009156x_6 \\
&- .015662x_8 + .000024x_{10} + .046599x_{13} - .001027x_{21} \\
&+ .000043x_{20}^2 + .008814x_{22} - .000189x_6x_{22} + .001410x_6x_{13} \\
&+ .000014x_7x_{10} - .000004x_{10}x_{22} - .000372x_{13}x_{22} \\
&+ .264317 \cdot 10^{-12}x_{15}^2 - .393145 \cdot 10^{-14}x_{17}^2 - .000006x_{18} \\
&+ .000012x_{19}^2 + \underline{e}.
\end{aligned}
$$

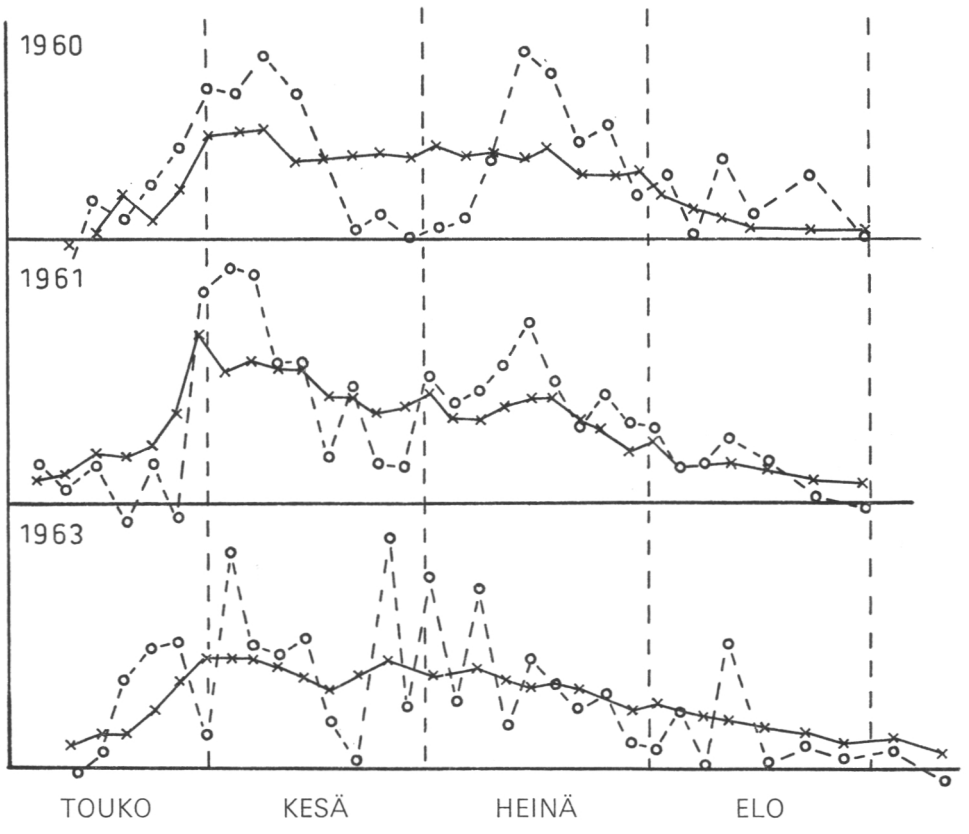
Mallin yhteiskorrelaatiokertoimen neliö [2]) $R_1^2 = .535$.

Kuvassa 6 esitetään esimerkkejä havainto- ja estimaattikäyristä ajan suhteen.

Mallia 5.2.2.(4.) laskettaessa oli jälleen x_{21} pakollisena (se oli merkitsevä 5 %:n tasolla). Muuttuja x_{19} jätettiin pois. Mallin empiirinen vastine tuli muotoon

[1]) Myös kaikissa seuraavissa mallien analysoinneissa oli hylkäämiskynnys 5 %:n tasolla. On huomattava, että valikoivassa regressioanalyysissä hylkäämiskynnys ei ole täysin tarkka.

[2]) R^2:n alaviitta osoittaa mallin järjestysluvun.



Kuva 6. Esimerkkejä havainto- ja estimaattikäyrien yhteensopivuudesta. Kuusi n:o 15. Malli 7.1.(1)

$$(2.)\quad \underline{y} = -1.342594 + .00262396x_1 + .011185x_2 + .006853x_3 + .003782x_4$$
$$+ .006854x_5 + .017961x_{13} + .445 \cdot 10^{-6}x_{15} - .166 \cdot 10^{-8}x_{17}$$
$$- .00974x_{18} + .001228x_{20} + .011316x_{21} + .007476x_{22}$$
$$- .723 \cdot 10^{-4}x_5^2 + .000080x_7^2 - .000051x_{22}^2 + \underline{e} \quad (R_2^2 = .504).$$

Kerrannaisia malleja estimoitaessa ja testattaessa käytettiin niistä logaritmista muunnosta 5.3.2.(3.), jolloin kunkin vaikutusfunktion logaritmi sijoitettiin perusmalliin.

Ensiksi analysoitiin joukkoja 5.3.2.(5.)—(7.) vastaavat mallit. Silloin täysin valikoivalla regressioanalyysillä saatiin kaikille joukoille sama empiirinen malli

$$(3.)\quad \ln\underline{y} = -6.43491 + .012132x_1 + .021609x_2 + .028335x_3 + .010482x_4 + .015611x_5 + 114811x_{13} - .000300x_{18} + .003807x_{20} - .007675x_{21} + .054109x_{22} - .000181x_5^2 - .005975x_{13}^2 - .000289x_{22}^2 + \underline{e} \quad (R_3^2 = .441).$$

Joukkoa 5.3.2.(8.) vastaavassa analyysissa oli korrelaatiomatriisissa 103 selittävää muuttujaa. Niistä valittiin regressioanalyysiin 84 muuttujaa, joilla katsottiin olevan mahdollisuus vaikuttaa $\ln\underline{y}$:n hajontaan. Valinta tapahtui siten, että selitettävän muuttujan kanssa heikoimmin korreloituneita muuttujia verrattiin keskenään, ja tärkeimmiksi katsotut jätettiin analyysiin mukaan. Eräissä vaikutusfunktioissa käytetyt $\varkappa_j$:t, τ_j:t ja Δ_j:t ovat taulukossa 4. Näitä arvoja käyttämällä saatiin logaritminen malli lineaariseksi.

Taulukko 4. Joukkoon 5.3.2.(8.) liittyvän mallin linearisoimiseen käytettyjä vakioarvoja.

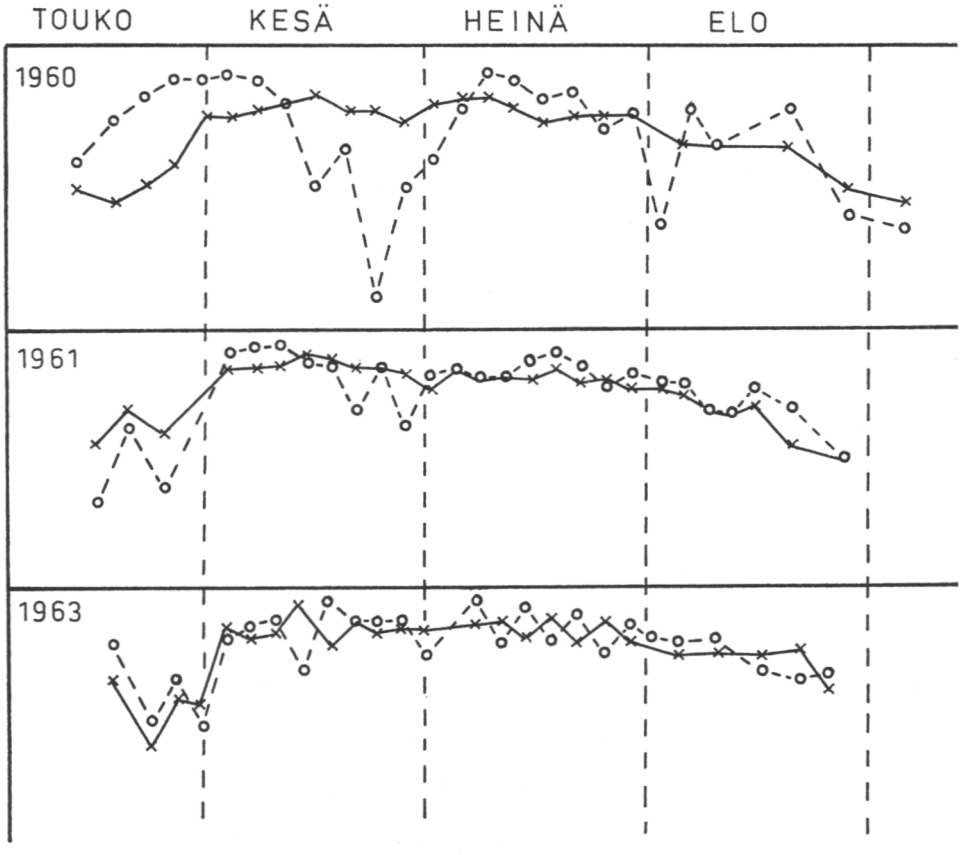
Parametrit	Parametreille annetut arvot			
$\varkappa_6$	+8	+9	+10	+11
$\varkappa_7$	−8	−9	−10	−11
$\varkappa_{10}$	−90	−100	−110	−120
$\varkappa_{12}$	+1	+2	+3	
$\varkappa_{13}$	+1	+2	+3	
τ_{22}	42	43	44	45
Δ_{22}	180	181	182	190

Täysin valikoivalla regressioanalyysilla saatiin empiirinen malli

$$(4.)\quad \ln\underline{y} = -.038925 + .200936x_{20} + .674362x_3 - .003613x_{20}^2 + .000480x_1^2 - .000239x_{22}^2 + 1.793483\ln(x_{22} - 42) - .022054x_2^2 - .005487x_{18} - 2.781215(x_{13} + 1)^{-1} - 2.596659\ln(x_6 + 8) - 4.517449(x_7 - 11)^{-1} - 466.444090(x_{10} - 120)^{-1} + .850 \cdot 10^{-5}x_{10}^2 - .3494815\ln(x_{10} - 120) + 2.781178\ln(x_6 + 9) + .000075x_{19} - 17573.339600x_{17}^{-1} + \underline{e} \quad (R_4^2 = .622).$$

Tämän jälkeen kokeiltiin mallia, jossa vaihdettiin muuttuja x_{22}^2 muuttujaan $(x_{22}-42)$ ja jätettiin pois muuttujat x_{10}^2, $\ln(x_{10}-120)$ ja $\ln(x_6+9)$. Silloin saatiin pakollisia muuttujia käyttämällä empiirinen malli.

$$(5.)\quad \ln \underline{y} = 15.878470 + .000432x_1^2 + .021332x_2^2 + .564235x_3 - .018067x_3^2$$
$$+ .190350x_{20} - .003336x_{20}^2 - .063687(x_{22} - 42)$$
$$+ 2.450243 \ln(x_{22} - 42) - .005254x_{18} - 4.185274(x_{13} + 1)^{-1}$$
$$- .157320 \ln(x_6 + 8) + .000039x_{19}^2 - 18270.3859x_{17}^{-1}$$
$$- .5360315(x_7 - 11)^{-1} + 48.96159(x_{10} - 120)^{-1} + \underline{e} \quad (R_5^2 = .599).$$



Kuva 7. Esimerkkejä havainto- ja estimaattikäyrien yhteensopivuudesta. Kuusi n:o 15. Malli 7.1.(6).

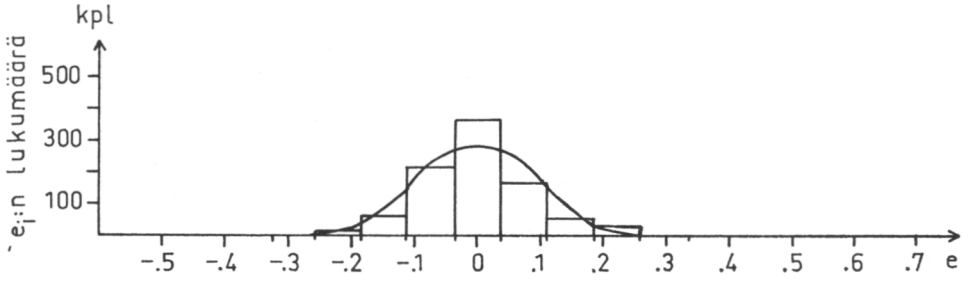
Edellisessä mallissa vaihdettiin muuttuja $\ln(x_6+8)$, joka ei ollut merkitsevä 5 %:n tasolla, muuttujaan $(x_6+8)^{-1}$, ja saatiin malli (vrt. kuva 7)

$$(6.)\quad \ln \underline{y} = -16.556260 + .000433x_1^2 + .021274x_2^2 + .565065x_3 - .018093x_3^2$$
$$+ .194993x_{20} - .003446x_{20}^2 - .063934(x_{22} - 42)$$
$$+ 2.462226 \ln(x_{22} - 42) - .005314x_{18} - 4.220328(x_{13} + 1)^{-1}$$
$$+ 2.865064(x_6 + 8)^{-1} + .000043x_{19}^2 - 18591.5337x_{17}^{-1}$$
$$- 5.622623(x_7 - 11)^{-1} + .486951(x_{10} - 120)^{-1} + \underline{e} \quad (R_6^2 = .600).$$

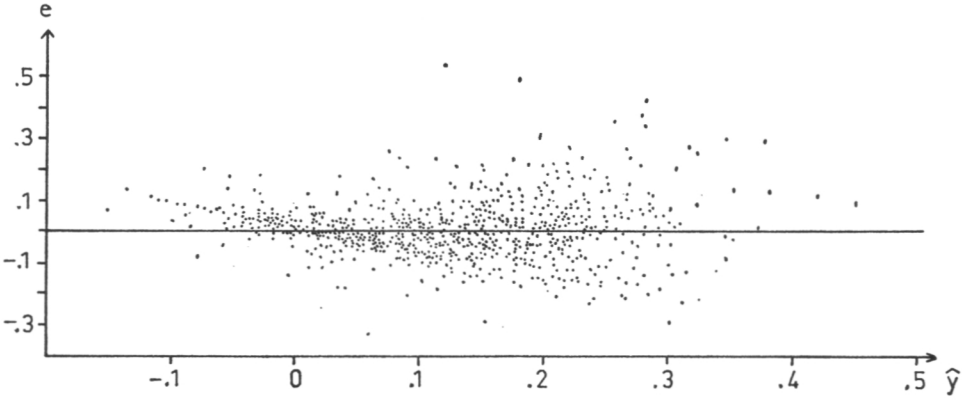
Kun mallissa (6.) suoritettiin muuttujien vaihdos, x_{22}—42 ja $\ln(x_{22}$—42) vaihdettiin x_{22}:een ja x_{22}^2:een, saatiin malli

$$
\begin{aligned}
(7.)\quad \ln \underline{y} = &-13.692590 + .022943x_2 + .524242x_3 + .182764x_{20} \\
&- .003248x_{20}^2 + .000408x_1^2 + .09395x_{22} - .000513x_{22}^2 \\
&- .016718x_3^2 - .005039x_{18} - 7.085554(x_{13}+1)^{-1} \\
&+ 5.179179(x_6+8)^{-1} + .000044x_{19}^2 - 15510.9943x_{17}^{-1} \\
&- 4.706606(x_7-11)^{-1} + .4575655(x_{10}-120)^{-1} + \underline{e}\ (R_7^2 = .596).
\end{aligned}
$$

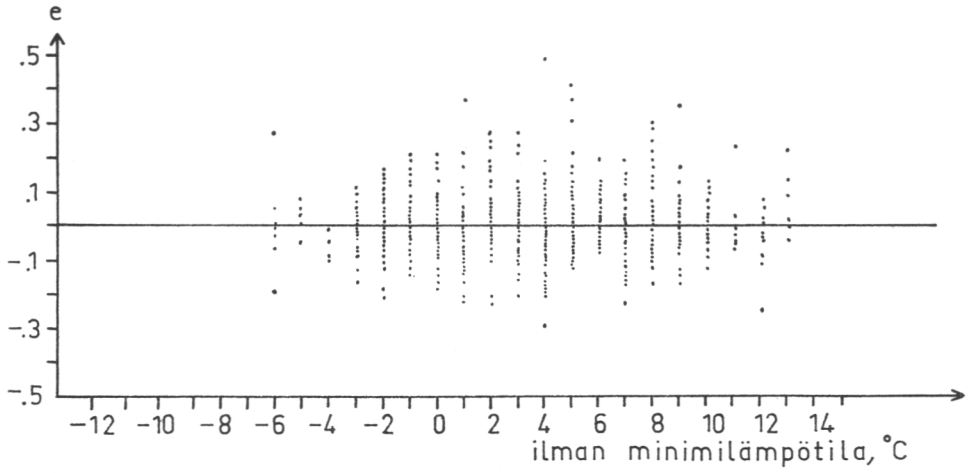
Regressioanalyysin oletusten paikkansapitävyyttä tarkasteltiin graafisten kuvausten avulla. Malleista 7.1. (1.) ja 7.1. (6.) piirrettiin kaikkien malleissa muuntamattomina esiintyvien muuttujien ja regressioestimaattorin suhteen jäännösvirheiden jakaumat. Lisäksi piirrettiin jäännöstermien jakauman histogrammi ja tätä histogrammia vastaava normaalijakauma.



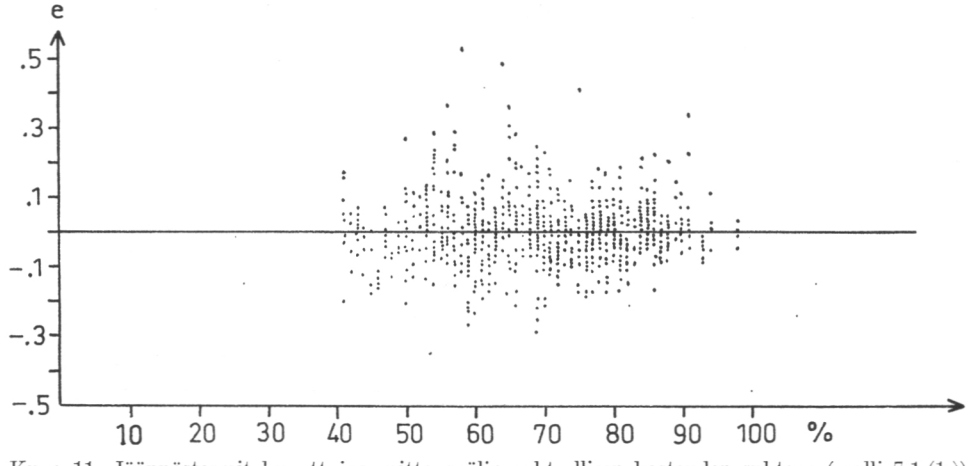
Kuva 8. Mallin 7.1.(1.) jäännöstermien normaalisuustarkastelu.



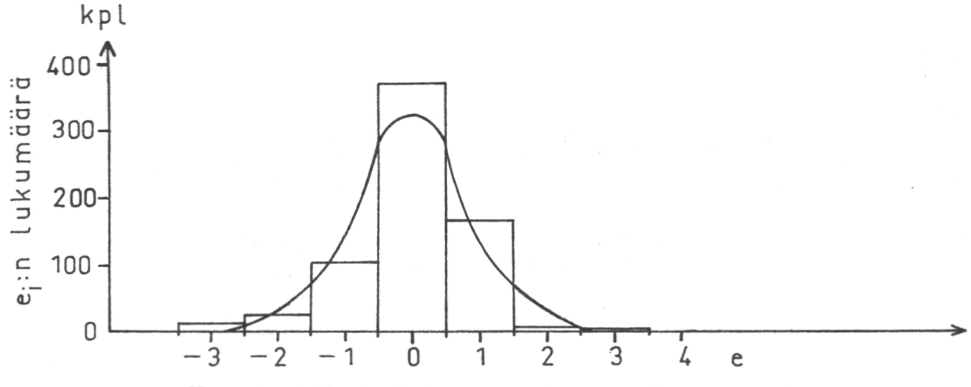
Kuva 9. Jäännöstermit esitettyinä regressioestimaatin suhteen (malli 7.1.(1.)).



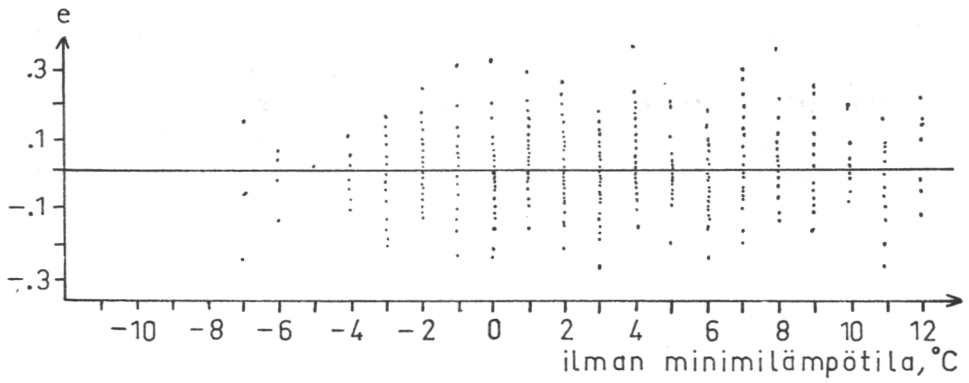
Kuva 10. Jäännöstermit kuvattuina minimilämpötilan suhteen (malli 7.1.(1.)).



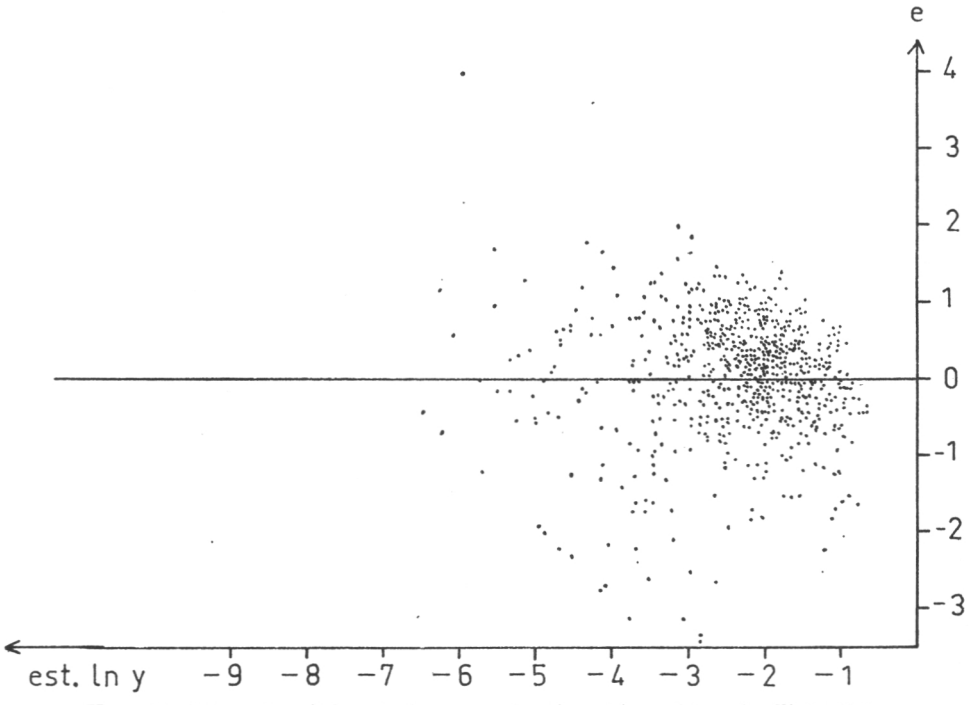
Kuva 11. Jäännöstermit kuvattuina mittausvälin suhteellisen kosteuden suhteen (malli 7.1.(1.))



Kuva 12. Mallin 7.1.(6.) jäännöstermien normaalisuustarkastelu.



Kuva 13. Jäännöstermit kuvattuina minimilämpötilan suhteen (malli 7.1.(6.)).



Kuva 14. Jäännöstermit kuvattuina regressioestimaattien suhteen (malli 7.1.(6.)).

Mallin 7.1.(1.) tarkastelussa huomattiin pahimmat poikkeamat oletuksista piirrettäessä jäännöstermien jakaumat regressioestimaattorin $\hat{y}$ ja ilman minimilämpötilan suhteen (vrt. kuvat 9 ja 10). Lisäksi ajan suhteen esiintyi jaksottaisuutta vuosina 1960 ja 1961 (vrt. kuva 6), ja keväisin sekä syksyisin regressioestimaatit saattoivat olla negatiivisia vaikka havainnot olivat keskimäärin positiivisia. Sen sijaan muiden selittäjien suhteen jäännöstermit jakautuivat kuten oletettiin (esim. vrt. kuva 11). Normaalisuustarkasteluissa havaittiin lievää oikeanpuoleista vinoutta (vrt. kuva 8).

Mallin 7.1.(6.) tarkastelussa huomattiin vakavimmat poikkeamat jäännöstermien jakaumissa ajan suhteen (vrt. kuva 7) vuosina 1960 ja 1961. Vuoden 1961 osalta oli trendimäisyys malliin 7.1.(1.) verrattuna vähentynyt. Normaalisuustarkastelussa huomattiin vinouden suunnan vaihtuneen, mutta se oli edelleenkin vähäistä (vrt. kuva 12). $\ln\underline{y}$:n estimaattorin suhteen vaihtui myös hajonnan kasvusuunta (vrt. kuva 14), mutta poikkeama varianssin stabiilisuusoletuksesta oli vähäinen. Jäännöstermien jakauma ilman minimilämpötilan suhteen parani myös (vrt. kuva 13). Näin ollen voidaan malliin 7.1.(6.) liittyviä nollahypoteeseja testata F-testillä luotettavammin kuin malliin 7.1.(1.) liittyviä.

Koska F-testi ja kaksipuolinen t-testi ovat melko robustisia normaalisuus- ja varianssin homogeenisuusoletusten suhteen ja selitysvirheiden autokorrelaatio lienee vähäinen, niin voitaneen mallien 7.1.(1.) ja 7.1.(6.) parametrien testeihin luottaa.

Mallien 7.1. (1.) ja 7.1. (6.) soveltuvuutta selittämään kasvua koealan 21 tyyppisellä suolla tutkittiin käyttämällä rinnakkaisaineistoa koealalta 19, joka oli samantyyppisellä suolla kuin koeala 21. Silloin suoritettiin regressioanalyysi mallien 7.1.(1.) ja 7.1.(6.) muuttujilla käyttämällä koealan 19 aineistoa.

Taulukko 5. Perusaineiston KA 21 ja rinnakkaisaineiston KA 19 mallien parametrien vertailu. Malli muotoa 7.1.(1.)

Kerroin	(1) KA 21	(2) KA 19	$100 \cdot \left\lvert \frac{(1)-(2)}{(1)} \right\rvert$ %
$\hat{\beta}_0$	—1.271754	—.499353	60.7
$\hat{\beta}_1$	.002229	.003302	48.1
$\hat{\beta}_2$	.009494	—.002096	122.1
$\hat{\beta}_3$	.005255	.008117	54.5
$\hat{\beta}_6$	.009156	.004858	46.9
$\hat{\beta}_8$	—.015662	—.006160	60.7
$\hat{\beta}_{10}$	.000240	.000321	33.8
$\hat{\beta}_{13}$	.046599	.030603	34.3
$\hat{\beta}_{21}$	—.001027	—.001807	75.9
$\hat{\beta}_{22}$	.008814	.004748	46.1
$\hat{\beta}_{6,22}$	—.000189	—.000067	64.6
$\hat{\beta}_{6,13}$	—.001410	.000290	120.6
$\hat{\beta}_{7,10}$	—.000014	.000008	42.9
$\hat{\beta}_{10,22}$	—.000004	—.000004	00.0
$\hat{\beta}_{13,22}$	—.000372	—.000317	14.8
$\hat{\beta}_{15,15}$	$.264317 \cdot 10^{-12}$	$.188865 \cdot 10^{-12}$	28.5
$\hat{\beta}_{17,17}$	$-.393145 \cdot 10^{-14}$	$-.158048 \cdot 10^{-14}$	59.8
$\hat{\beta}_{18,18}$	—.000006	—.000002	66.7
$\hat{\beta}_{19,19}$	.000012	.000013	8.3
$\hat{\beta}_{20,20}$	.000043	.000019	55.8
$\hat{\beta}_{22,22}$	—.000029	—.000008	72.4
R^2	.5351	.3873	

Taulukko 6. Perusaineiston KA 21 ja rinnakkaisaineiston KA 19 mallien parametrien vertailu. Malli muotoa 7.1.(6.).

Muuttuja	(1) KA 21	(2) KA 19	$100 \cdot \left\lvert \frac{(1)-(2)}{(1)} \right\rvert$ %
α°	—16.556260	—15.686950	5.2
x_1^2	.000433	.0001083	75.1
x_2^2	.021274	—.0132591	62.3
x_3	.565065	.811710	43.6
x_3^2	—.018095	—.025950	43.4
$(x_6+8)^{-1}$	2.865064	2.014201	29.7
$(x_7-11)^{-1}$	—5.622623	—7.781142	38.4
$(x_{10}-120)^{-1}$	.486951	.149604	69.3
$(x_{13}+1)^{-1}$	—4.220328	—5.464120	29.5
x_{17}^{-1}	—18591.533700	—19410.638180	4.4
x_{18}	—.005314	—.001122	78.9
x_{19}^2	.000043	.000034	20.9
x_{20}	.194993	.143234	26.5
x_{20}^2	—.003446	—.002779	19.4
$(x_{22}-42)$	—.063934	—.062766	1.8
$ln(x_{22}-42)$	2.462226	2.313246	6.1
R^2	·6004	·4290	

Perusaineistosta ja rinnakkaisaineistosta estimoitujen malliparametrien vertailut ovat taulukoissa 5 ja 6. Huomataan, että R^2:n arvo on laskenut 7.1.(1.) muotoisella mallilla .535:stä .387:än ja mallilla 7.1.(6.) .600:sta .429:än. Rinnakkaisaineistosta lasketut parametrien estimaatit poikkeavat kummallakin mallilla perusaineiston vastaavista estimaateista niin paljon, että regressiokerrointen muuttuminen aineistosta toideen siirryttäessä on ilmeinen. Mallissa 7.1.(6.) ainoastaan aikatrendin kertoimet pysyvät likimain samoina. Edellä mainituista syistä ei malleja voida pitää yleistyskelpoisina, vaan lisäkehittely on tarpeen. Tällöin voitaisiin käyttää joustavampia laskualgoritmeja, jolloin askeltaminen myös havaintojen suunnassa olisi mahdollista (V ä l i a h o 1969).

7.2. Tulosten tarkastelu

Tässä tarkastellaan mallien 7.1.(1.) ja 7.1.(6.) antamia tuloksia tarkemmin, koska mallit vaikuttavat estimoiduista malleista realistisimmilta.

Kun tarkastellaan mallin 7.1.(1.) kertoimien etumerkkejä, havaitaan niiden olevan yleensä loogisesti oikeita. Poikkeuksina ovat kertoimet $\hat{\beta}_1$ ja $\hat{\beta}_{17,17}$. $\hat{\beta}_1$:n merkki saattaa olla väärä siksi, että etäisyys ojasta-muuttujan keskiarvo on 55.7 m ja hajonta vain 5.6 m, jolloin sen vaikutuksen suuntaa on vaikea arvioida. $\hat{\beta}_{17,17}$:n merkki saattaa olla loogisesti väärä siksi, että

korkea kokonaissäteily syksyllä merkitsee yleensä koleita öitä, jolloin vararavinnon muodostuminen voi vähentyä. Mutta väärän merkin voi aiheuttaa myös kyseisen muuttujan korreloituminen muiden muuttujien kanssa (erikoisesti x_{15}:n kanssa), koska mallissa 7.1.(6.) vastaava etumerkki on oikea.

Kertoimien $\hat{\beta}_{6,22}$, $\hat{\beta}_{10,22}$ ja $\hat{\beta}_{13,22}$ merkitsevyys osoittaa, että muuttujien x_6, x_{10} ja x_{13} vaikutus muuttuu ajan mukana. $\hat{\beta}_{6,13}$:n merkitsevyys ja positiivisuus osoittavat, että kasvu lisääntyy, kun minimilämpötila ja kokonaissäteily kumpikin lisääntyvät. $\hat{\beta}_{15,15}$ merkitsevyys ja positiivisuus tukevat vararavintohypoteesia. $\hat{\beta}_{18}$:n merkitsevyys ja negatiivinen etumerkki tukevat oletusta kukinnan haitallisuudesta puuaineksen kasvulle. Lisäksi olivat merkitseviä ja loogisesti oikeilla etumerkeillä varustettuja kertoimet $\hat{\beta}_2$, $\hat{\beta}_3$, $\hat{\beta}_6$, $\hat{\beta}_8$, $\hat{\beta}_{10}$, $\hat{\beta}_{13}$, $\hat{\beta}_{19,19}$, $\hat{\beta}_{20,20}$, $\hat{\beta}_{22}$, $\hat{\beta}_{22,22}$. $\hat{\beta}_8$ ja $\hat{\beta}_{20,20}$ liittyvät hydrostaattista vaihtelua selittäviin muuttujiin. $\hat{\beta}_8$:n negatiivisuus osoittaa, että mittauspäivän keskilämpötilan kasvaessa puu kutistuu. Vastaavasti $\hat{\beta}_{20}$:n positiivisuus osoittaa, että mittauspäivän suhteellisen kosteuden kasvaessa puu turpoaa. On huomattava, että muuttuja x_{23} ei tullut malliin missään muodossa, joten tämä aineisto ei tue K r a m e r i n (1957) havaintoa, jonka mukaan ilman minimi- ja maksimilämpötilan erotuksen lisääntyminen lisää puiden kasvua.

Mallin 7.1.(6.) kertoimien etumerkit ovat enimmäkseen loogisesti oikeita. Vain x_1^2:n, $(x_6+8)^{-1}$:n ja $(x_{10}-120)^{-1}$:n kerrointen etumerkit ovat odotusten vastaiset. x_1^2:n kertoimen suhteen pätee sama kuin mallissa 7.1.(1.). $(x_6+8)^{-1}$:n kertoimen etumerkkiin vaikuttanevat $(x_7-11)^{-1}$ ja $(x_{13}+1)^{-1}$, joiden kanssa (x_6+8):n otoskorrelaatiokertoimet ovat $r_{6,7} = .438$ ja $r_{6,13} = .478$. $(x_{10}-120)^{-1}$:n etumerkkiin vaikuttanee x_{19}^2, koska muuttujien välinen otoskorrelaatiokerroin on $r_{13,19} = .591$.

Yleensä koealalta 21 mitatussa aineistossa selittävien muuttujien väliset korrelaatiokertoimet ovat pieniä, joten multikollineaarisuuden tuloksia vääristävää vaikutusta tuskin esiintyy kovin paljon. Edellä mainitun tapauksen lisäksi ovat $(x_{22}-42)$:n ja $\ln(x_{22}-42)$:n korreloiminen $(x_{13}+1)$:n kanssa huomattava ($r_{13,22} = -.657$ ja $r_{13,22} = -.804$). Multikollineaarisuuden mahdollisuuden vuoksi pääpaino on asetettu nollahypoteesin H_o:$\beta_o = 0$, $j = 1, \ldots, n$ testaamiseen F-testillä eikä kertoimien välisiä eroja tarkastella tarkemmin.

8. TIIVISTELMÄ

Puun kasvun ja ympäristötekijöiden välisen riippuvuuden selvittäminen on välttämätöntä pyrittäessä ymmärtämään kasvun perusolemusta. Puulajien elinikäisen kehityksen oleelliset piirteet tunnetaan, kun aikayksikkönä on vuosi. Tässä tutkimuksessa pyrittiin selvittämään kuusen ympärysmitan kasvutapahtumaa lyhyin aikavälein (aikaväli = n vrk, jossa n = 1, . . ., 30).

Tutkimuksessa käytetty aineisto oli kerätty metsäntutkimuslaitoksen suontutkimusosaston toimesta Keski-Suomesta Vilppulan kunnasta vuosina 1956—64, ja sitä täydennettiin Juupajoen, Luonetjärven ja Tampereen sääasemien tiedoilla.

Tutkimus rajoitettiin kuusiaineistoon vuosilta 1958—64. Kuusiaineistoon rajoituttiin siksi, että kasvureaktiot olivat olleet kuusella selvästi voimakkaammat kuin muilla puulajeilla. Siten mahdollisuus tilastollisen säännönmukaisuuden peittymiseen mittausvirheisiin oli sillä pienin. Graafiset esitarkastelut suoritettiin koko käyttökelpoisesta kuusiaineistosta. Varsinaisessa mallien analyyttisessä kehittelyssä käytettiin kahden koealan aineistoja.

Tutkimuksen päämääränä oli selvittää kosteuden vaihtelujen (ilmassa ja maassa), lämpötilojen vaihtelujen (ilmassa ja maassa), edellisen syksyn sääolosuhteiden ja saman vuoden käpysadon vaikutuksia kuusen ympärysmitan kasvuun.

Kuusen ympärysmitan kasvutapahtuman tilastomatemaattisissa malleissa käytettiin perustyyppeinä kvadraattista ja kerrannaista mallia. Kvadraattisesta perusmallista käytettiin epätäydellisiä muunnelmia, koska selittävien muuttujien lukumäärä oli suuri (m = 23). Kerrannaiseen perusmalliin sijoitettiin erilaisia selittävien muuttujien vaikutusfunktioyhdistelmiä. Kerrannaiset mallit linearisoitiin logaritmoimalla ja korvaamalla logaritmoinnin jälkeiset epälineaarisuusparametrit etukäteen arvioiduilla arvoilla.

Mallien parametrien estimoinnissa käytettiin valikoivaa regressioanalyysiä, jolla etsittiin parhaiten selittäviä malleja. Sekä kvadraattisista että kerrannaisista malleista parasta sovellettiin rinnakkaisaineistoon niiden käyttökelpoisuuden toteamiseksi. Tällöin todettiin, että mallien vastinparametrit eri aineistoilla poikkesivat ilmeisesti toisistaan, joten mallien edelleen kehittämistä on jatkettava. Tällöin on aloitettava joustavampien mallien kehittäminen ja joustavampien laskualgoritmien käyttö parametrien

estimoinnissa. Joustavampien mallien käyttöä puoltavat myös mm. eräiden selittäjien ja ajan ristitulotermien mukaantulo kvadraattiseen malliin.

Saadut tulokset tukevat melkein kaikkia tehtyjä hypoteeseja. Mielenkiintoisimmat tällaisista hypoteeseista ovat vararavinto- ja kukintahypoteesit. Vararavintohypoteesin mukaan edellisen syksyn sääolosuhteet vaikuttavat seuraavan vuoden kasvuun. Ehkä mielenkiintoisin hypoteesi, jota tämä aineisto ei tue, on että kasvu lisääntyy ilman minimi- ja maksimilämpötilojen erotuksen kasvaessa. Koska mallit eivät ole edellä mainituista syistä täysin luotettavia, tulosten perusteella ei voida tehdä lopullisia johtopäätöksiä.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Anderson, R. L. 1954. The problem of autocorrelation in regression analysis. J. Amer. Statist. Assoc. 49.

Baule, B. 1917. Zu Mitscherlichs Gesetz der physiologischen Beziehungen. Landw. J.ber. 51: 363—385.

Cochran, W. G. 1963. Sampling Techniques, 2. edition. New York.

Cochran, W. G. & Cox, G. M. 1957. Experimental Designs, 2. edition. New York.

Deming, W. W. 1960. Sample Design in Business Research. New York.

Draper, N. R. & Smith, H. 1966. Applied Regression Analysis. New York.

Efroymson, M. A. 1961. Multiple Regression Analysis. Ralston & Wilf. Mathematical Methods for Digital Computers, Vol. I. 2. printing ss. 191—203. New York.

Friesner, R. C. 1942. Dendrometer studies of five species of broadleaf trees in Indiana. Butler Univ. Bot. Studies 5: 160—172.

Frisch, R & Waugh, F. V. 1933. Partial time regressions as compared with individual trends. Econometrica 1: 387—401.

Fritts, H. C. 1958. An analysis of radial growth of beech in a central Ohio forest during 1954—1955. Ecology 39: 705—720.

Goulden, C. H. 1956. Methods of Statistical Analysis, 2. edition. New York.

Hald, A. 1962. Statistical Theory with Engineering Applications. New York.

Hemberg, T. 1940. Growth inhibiting substances in terminal buds of Fraxinus. Physiologia Plantarum 2: 37—44.

Hemmerle, R. 1967. Statistical Computations on a Digital Computer. New York.

Huikari, O. 1958. Kasvualustan lämpötilan merkitys puiden kasvutekijänä. Summary: On the significance of the temperature of the nutrient layer as a growth factor for trees. Metsätal. Aikak.l. 10.

—»— 1961. Roudasta puiden kasvutekijänä. Terra 4.

—»— 1965. Importance of Soil Temperature, Height of Water Table, and Microclimate as Growth Factors of Pine, Spruce, and Birch. Final Report for Project Number E8-FS-36 (PL 480). Helsinki. Moniste metsäntutkimuslaiitoksen suontutkimusosaston käsikirjastossa ja FAO:ssa Roomassa.

—»— 1967. Soiden metsätaloudellisen hyväksikäytön perusteita. Metsätal. Aikak.l. 2.

Huikari, O., Muotiala, S. & Wäre, M. 1963. Ojitusopas. Helsinki.

Huikari, O. & Paarlahti, K. 1967. Results of field experiments on the ecology of pine, spruce, and birch. Commun.Inst. For. Fenn. 64.1. Helsinki.

Hustich, I. 1948. The Scots pine in northernmost Finland and its dependence on the climate in the last decades. Acta Bot. Fenn. 42.

Ilvessalo, Y. 1965. Metsän arviointi. Helsinki.

Jonsson, B. 1969. Studier över den av väderleken orsakade variationen i årsringsbredderna hos tall och gran i Sverige. Institutionen för skogsproduktion. Stockholm.

Kanerva, P. 1963. Tutkimus männyn paksuuden muutosten mittaamisesta ja analysoinnista pantamenetelmällä. Helsingin Yliopiston metsänarvioimistieteen laitos (julkaisematon).

Kendall, M. G. & Stuart, A. 1967. The Advanced Theory of Statistics. Vol. II, 2. edition. London.

—»— 1968. The Advanced Theory of Statistics. Vol. III. London.

Kolkki, O. & Rossi, V. 1957. Ilmatieteelliset havainnot Suomessa vuonna 1947. Osa I. Helsinki.

Kramer, P. J. 1957. Some effects of various combinations of day and night temperatures and photoperiod on the height growth of loblolly pine seedlings. Forest Science 3: 45—55.

Kramer, P. J. & Kozlowski, T. T. 1960. Physiology of Trees. London.

Laitakari, E. 1920. Tutkimuksia sääsuhteiden vaikutuksesta männyn pituus- ja paksuuskasvuun. Referat: Untersuchungen über die Einwirkung der Witterungsverhältnisse auf das Längen- und Dickenwachstum der Kiefer. Acta For. Fenn. 17.

Lang, A. 1957. The effect of gibberellin upon flower formation. Proc. Nat. Acad. Sci. (U.S.). 43: 709—717.

Ledig, F. Th. & Perry, Th.O. 1969. Net Assimilation Rate and Growth in Loblolly Pine Seedlings. Forest Science 4: 431—438.

Leikola, M. 1969. The Influence of Environmental Factors on the Diameter Growth of Forest Trees. Auxanometric Study. Acta For. Fenn. 92.

Lockhart, J. A. 1961. Interactions between gibberellin and various environmental factors on stern growth. Amer. J. Bot. 48(6): 516—525.

MacDougall, D. T. 1921. Growth in trees. Carnegie Inst. of Washington. Publ. 307.

—»— 1938. Tree growth. Leiden.

Metsälehti. Numerot 46—1958, 38—1959, 44—1960, 50—1961, (1—2)—1963, (51—52)—1963 ja 2—1965.

Mikola, P. 1950. Puiden kasvun vaihteluista ja niiden merkityksestä kasvututkimuksissa. Summary: On variations in tree growth and their significance to growth studies. Commun. Inst. For. Fenn. 38:5.

Rao, C. R. 1965. Linear Statistical Inference and its Applications. New York.

Richards, L. A. & Wadleich, C. H. 1952. Soil water and plant growth. Chap. 3 in B.T. Shaw (ed): Soil physical conditions and plant growth. New York.

Sarvas, R. 1966. Metsäpuiden kehityksen vuotuinen periodi. Metsätal. Aikak.l. 12.

Sirén, G. 1955. Pine at the timberline as an indicator of climatic fluctuations in Fennoscandia in historic times. Acta For. Fenn. 60.

Suomen Meteorologinen Vuosikirja. Niteet 57—60, 61—62, 63 ja 64. Osa 4: Säteily ja auringonpaistehavainnot 1957—1960, 1961—1962 ja 1963—1964.

Väliaho, H. 1964. Regressioanalyysin suorittaminen tietokoneella. Tilastomatematiikan perusteet II. Suomen Teknillinen Seura. Helsinki.

—»— 1969. A Synthetic Approach to Stepwise Regression Analysis. Comment. Phys.-Math. 34.

Yates, Fr. 1960. Sampling Methods for Censuses and Surveys. London.

SUMMARY

When trying to understand the fundamental nature of tree growth, it is necessary to determine the dependence between growth and environmental factors. The essential features of the development of tree species during their lifetime are already known for time units of one year. The purpose of this study is to elucidate the process producing circumference growth in spruce over short time intervals (time interval = n days; n = 1, . . ., 30).

The material used in this study was gathered by the Department of Peatland Forestry, the Finnish Forest Research Institute, at Vilppula in Central Finland between 1958—64. Information received from the meteorological stations of Juupajoki, Luonetjärvi and Tampere was added to the material later on.

The investigation was restricted to spruce *(Picea abies (L.) KARST)* material collected during the years 1958—64. This was done because the growth reactions of spruce were clearly stronger than those of other tree species. Thus, the possibility of statistical regularities becoming obscured by measurement errors was small. All the material which could be used was subjected to a graphic examination. Material from two experimental plots was used in the analytical development of the models.

The aim of this study was to clarify how the circumference growth is influenced by fluctuations in humidity (in air and soil), fluctuations in temperature (in air and soil), weather conditions of the previous autumn and the cone crop of the same year.

Quadratic and multiplicative models are the principal types used in developing mathematico-statistical models for the process which produces circumference growth in spruce. Incomplete modifications of the basic quadratic model were used because of the great number of independent variables (m = 23). Different influence-function combinations of independent variables were added to the basic multiplicative model. Multiplicative models were linearized by logging. The nonlinearity parameters remained in the model after logging were replaced by values approximated beforehand.

When estimating parameters of the models, a selective regression analysis was used in order to determine which models gave the best explanation. The best quadratic model and the best multiplicative model were both applied to some parallel material in order to check their usability. It was found that corresponding parameters of models estimated from the groups of material clearly differed from each other and, therefore, it is necessary to continue developing the models. Thus, an attempt must be made to develope more flexible models and to use more flexible computation algorithms in the estimation of model parameters.

Inclusion of cross-product terms of some independent variables and time in the quadratic model also argues in favor of the use of more flexible models.

The results obtained give support to almost all the hypotheses which were made. The most interesting of the hypotheses which are confirmed by the results are those concerning photosynthate storage and flowering. According to the photosynthate

storage hypothesis, weather conditions of the previous autumn have an influence on the growth of the current year. According to the flowering hypothesis, the cone crop has a negative influence on the growth of the current growing period. Perhaps the most interesting hypothesis not confirmed by this material is that the growth increases at the same time as the difference between the daily minimum and maximum temperatures of air is getting greater. Because the models are, for the reasons stated above, not completely reliable, it is not possible to draw ultimate conclusions.

CORRECTING STEM GIRTH MEASURES FOR VARIATIONS INDUCED BY SOIL MOISTURE CHANGES

ERKKI AHTI

SELOSTE:

MAAN KOSTEUSMUUTOSTEN AIHEUTTAMAN PAKSUUSVAIHTELUN ELIMINOIMINEN MITATTAESSA PUIDEN PÄIVITTÄISTÄ PAKSUUSKASVUA

HELSINKI 1973

ABSTRACT

A h t i, E. 1973. Correcting stem girth measures for variations induced by soil moisture change. Seloste: Maan kosteusmuutosten aiheuttaman paksuusvaihtelun eliminoiminen mitattaessa puiden päivittäistä paksuuskasvua. Commun. Inst. For. Fenn. 78.4.

Measuring daily diameter growth of trees, variation caused by moisture changes tends to obscure the diameter changes due to growth. The diameter variation caused by the daily rhythm of transpiration can be eliminated by making the measurements at a constant time of the day. By this method, the variation caused by long-term moisture changes is not eliminated.

In this paper, it is shown that the relationship between stem circumference of shallow-rooted pines growing on peat and soil moisture tension of the root layer is markedly close. A simple correction procedure is introduced.

ISBN 951-40-0062-5

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

CONTENTS

	Page
1. Introduction	5
2. Measuring methods	6
A. Measuring stem circumference	6
B. Measuring the moisture tension of the root layer	6
3. Material and methods of analysis	7
A. The time series to be analysed	7
B. Processing the material for regression analysis	7
a. General	7
b. Fitting a reference curve to the cumulative circumference data	8
4. Results	11
A. The relationship between stem circumference and soil moisture tension	11
B. Sources of error	12
C. Correcting the circumference observations by means of the regression model	14
5. Discussion	15
Acknowledgements	16
References	17
Seloste	18

1. INTRODUCTION

In the soil-plant-atmosphere system (see e.g. H i l l e l 1971) water moves along gradients of potential energy. The flow of water from soil to root and through the vascular system of the plant to the atmosphere is due to the fact that soil water possesses more potential energy than does the water vapour surrounding the transpiring surfaces of the plant.

F r i e d r i c h (1897) noticed that the variation of stem diameter of forest trees follows a diurnal rhythm. The same phenomenon has since been observed by many others (review e.g. L e i k o l a 1969). This variation has been attributed to moisture changes caused by the diurnal rhythm of transpiration. During the day, the absorption of water by the roots usually lags behind transpiration. Consequently, the water tension increases and, correspondingly, the water content of the water-conducting tissues decreases, and stem shrinkage occurs. During the night, transpiration deminishes and usually ceases. The absorption of water, however, goes on, until a state of equilibrium is reached, i.e., until no gradients of water potential (see H i l l e l 1971, p. 207) exist. During the overnight equilibration process, stem swelling occurs, and a diameter maximum is usually observed early in the morning before transpiration begins.

Because the main part of the water-conducting tissues of tree stems are dead, it can safely be assumed that the osmotic energy component is of negligible importance for defining the equilibrium potential energy of stem water. Thus, the equilibrium potential can be defined as the sum of the pressure component and the gravitational component of potential energy. The following equations can be written:

h = pressure energy
z = gravitational energy

$$h_{stem} + z_{stem} = h_{soil} + z_{soil} \tag{1}$$

and

$$h_{stem} = h_{soil} - (z_{stem} - z_{soil}) \tag{2}$$

As W o r r a l (1966) has shown, the relationship between stem diameter and stem water stress is linear. According to equation (2), at equilibrium,

a linear relationship between soil water tension and stem diameter could be expected, on the assumption that a soil water tension value representative for the root zone could be determined.

In this paper, the relationship between soil water tension and the stem circumference of shallow-rooted Scots pine growing on peat is studied.

2. MEASURING METHODS

A. Measuring stem circumference

In measuring the daily diameter growth of trees the diameter variation caused by the diurnal rhythm of transpiration can be eliminated in two ways. Either the diameter is measured at a fairly constant time in the morning, when the water content of the tree can be assumed to be closest to its diurnal maximum and to an equilibrium (Huikari and Paarlahti 1967), or a recording device is used, which allows a reliable determination of the diameter maximum from a graph. By using these methods, the hypothetical diameter variation caused by changes in the equilibrium water content cannot, however, be eliminated. Consequently, the diameter variation caused by the diurnal rhythm of transpiration can be eliminated by using one of the two methods, and the diameter measures can still be used for the purpose of this study.

From a 15 × 40 m experimental plot established in a drained swamp in Vilppula, Finland, changes in the circumference (at breast height) of 12 Scots pines were measured with tree ring bands (the experimental area has been described by Huikari and Paarlahti 1967). The water level in the ditches surrounding the experimental plot had been regulated to a depth of 70 cm (op.quot., p. 26). The measurements were made at about 0800 hours on five days of the week in the period June 9 to August 26, 1971.

The breast height diameter of the 12 experimental trees varied from 10.3 to 16.6 cm and the height from 7.8 to 11.1 m. The trees belonged to the dominant crown layer.

B. Measuring the moisture tension of the root layer

As the roots of Scots pine growing on peat are concentrated quite close to the soil surface (Heikurainen 1955, Paavilainen 1966), soil moisture tension at a depth of approx. 5 cm was chosen to indicate the moisture of the root layer. A tensiometer model developed by F. Richard (Brülhart 1969, Ahti 1971) was used in the measure-

ments. The length of the porous cup of this tensiometer was 5.7 cm. The observation values, consequently, do not represent the soil moisture tension at a depth of 5 cm but the average tension in a 2—8 cm layer. As there was reason to expect the soil moisture tension so close to the peat surface to rise above the measuring amplitude of a tensiometer (about 0.8 bar), it was also measured deeper where peat could be expected to be more moist on average.

As the number of tensiometers available was limited to eighteen, instead of trying to obtain soil moisture tension values representing the average of the 2—8 cm layer, relative figures characterising the moisture stress variation were aimed at. The main target was to obtain a continuous observation series for the measurement period as a whole. At three points on one diagonal of the experimental plot, six tensiometers were placed as follows: two at depths of 5 and 10 cm, and one at 20 and 30 cm. The moisture tension was each time measured immediately after measuring the circumference of the experimental trees.

3. MATERIAL AND METHODS OF ANALYSIS

A. The time series to be analysed

The essential part of the material is made up of two time series: tree circumference and soil moisture tension as functions of time. Both time series comprise 57 observations (observation days). The tensiometer readings at 10, 20, and 30 cm are not used in this connection, because the tensiometers at 5 cm functioned properly throughout the observation period.

Every soil moisture tension value is an average of the readings of six tensiometers. The circumference values are means of 11 experimental trees. One of the 12 experimental trees had to be rejected because of failure of measurements.

B. Processing the material for regression analysis

a. General

In analysing time series, it is common to use correlation or regression analysis. If the time series to be analysed includes a trend, i.e., successive observations are not independent of each other, use of regression analysis requires elimination of the trend. The so-called cumulative growth curve of a tree, because of the irreversibility of cambial growth, includes a rising trend. Additionally, the curve comprises seasonal variation, which, like the trend, must be eliminated if regression analysis is to be used.

The variation of tree circumference is dependent on meteorological changes. For regression analysis, the meteorological factors can be regarded as random variables (Ezekiel 1950, p. 353). Consequently, changes in tree circumference can also be regarded as random and successive changes independent of one another. The rising trend can thus be eliminated by taking the daily circumference change as the dependent variable instead of the circumference itself. The seasonal variation is partly eliminated by taking the difference of successive circumference changes as the dependent variable. In analysing the daily growth of trees, average or cumulative values of the independent variables during a measuring interval, frequently also minimum and maximum values, are used.

b. Fitting a reference curve to the cumulative circumference data

As mentioned before, stem circumference reaches its diurnal maximum early in the morning when the water deficit from the preceding day is at its minimum, and a state of equilibrium corresponding to the soil water tension is approached. Since our interest is in the relationship between the stem circumference in the morning and the corresponding soil water tension, there is no reason to use average or cumulative variable values, as far as the two variables mentioned are concerned. The above trend-elimination procedure therefore does not seem rational. On the other hand, its use would even be inconvenient, as measurements were made only on five days of the week. Nor, for the same reason, is modification of the material by using moving averages (e.g. Leikola 1969, p. 175) possible.

In Fig. 1, the cumulative growth curve of the experimental trees and the soil moisture tension as a function of time are given. If a curve is drawn through the time points of the cumulative growth curve that represent the same soil moisture tension, a tentative reference level of stem circumference is obtained, which, because of the relationship between soil moisture tension and stem water stress at equilibrium, is assumed to correspond to the same degree of shrinkage of the stem. The fitted curve in Fig. 1 was drawn through the time points that correspond to a soil moisture tension of 100 cmH_2O (0.1 bar). Theoretically, it would have been possible to choose any observed soil moisture tension value as the reference value. In this case 100 cmH_2O, being close to the midpoint of the variation range of the observed values, seemed to be the most suitable reference value.

On the premisses given above, the fitted curve represents a fixed degree of shrinkage of the stem. Correspondingly, the circumference values above

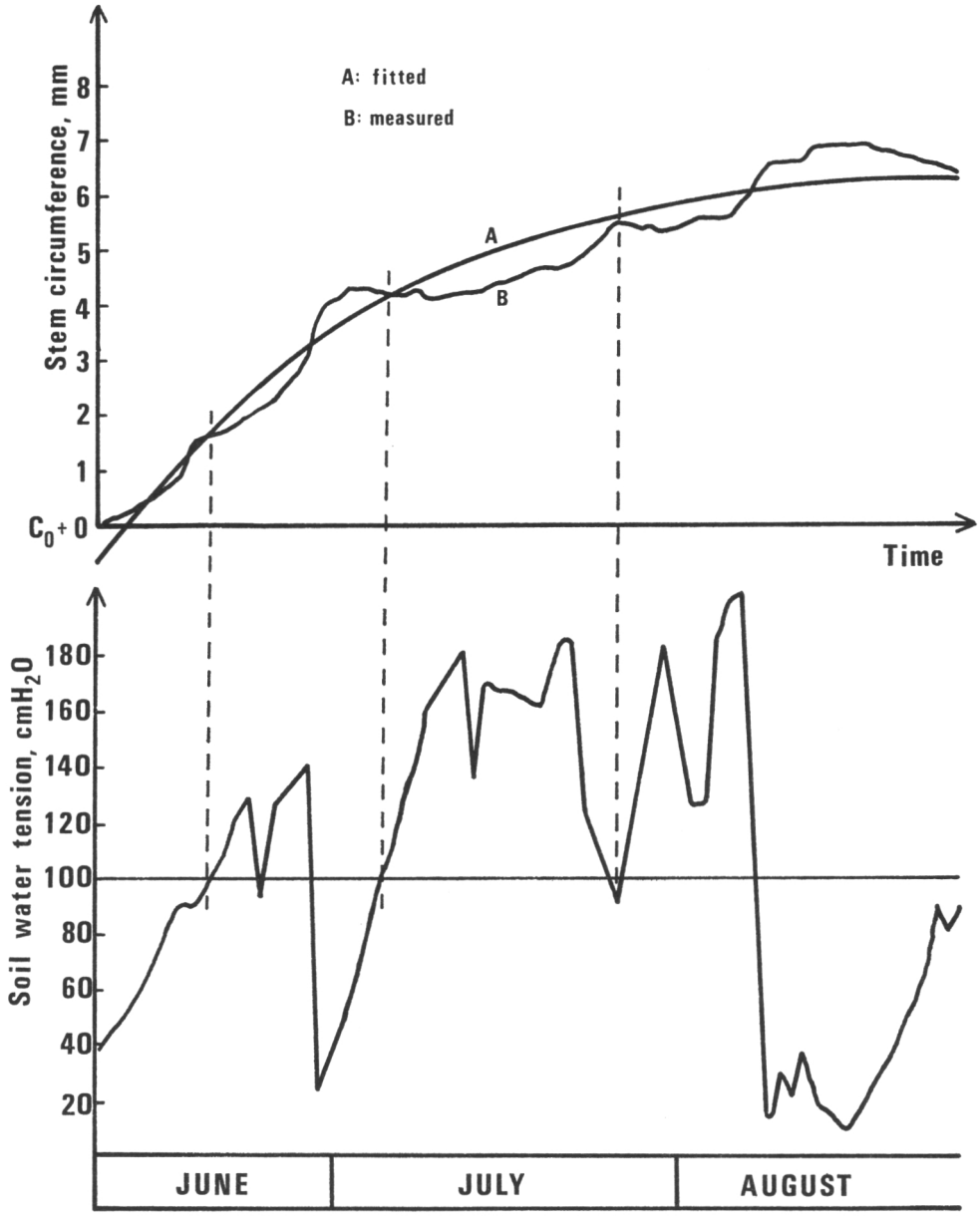


Figure 1. Stem circumference and soil moisture tension as functions of time. C_0 = stem circumference at the beginning of the measurement period.

the fitted curve (Fig. 1) can be assumed to represent soil moisture tensions lower than 100 cmH_2O, and vice versa.

By taking the deviation of the observed circumference value (cumulative growth curve) from the hand-fitted reference curve as the dependent variable, both the general increasing trend and partly the seasonal variation of the cumulative growth curve can be eliminated.

As the method of drawing the reference curve is of decisive importance for the statistical relationship between stem circumference variation and soil moisture stress change, the free-hand fitting procedure used above may seem to be very crude. It is, however, the only way of fitting that is based on the physics of water uptake of a tree. If a curve type that can be expressed by means of a mathematical equation had been chosen and the method of least squares had been used, the fitting would have been completely random from the physical point of view. If no logical basis of fitting can be developed, »a curve fitted by a definite equation yields only an empirical statement of the relationship and may fail to show the true relation» (E z e k i e l 1950, p. 127).

It may be argued that, during rains, a tree absorbs water also through the crown and that the relationship between soil moisture tension and tree water content then changes: immediately after rain, a tree may contain more water than at equilibrium. Although the role of water absorption through the needles is not fully known (S l a t y e r 1967, p. 232), there is a chance of error in this respect. In fitting the reference curve, this error was avoided by choosing a reference value of soil moisture tension (100 cmH_2O) that did not occur until the soil-drying process had continued for several days after a fall of rain. It is, however, possible that individual circumference observations made immediately after a rainfall include an error caused by water absorption through the foliage. But it is also quite clear that the excess water is lost in one day's transpiration, and that a normal equilibration process takes place during the following night. As these errors do not affect the fitting of the reference curve, it is possible that the effect of rainy days can be estimated from the residuals of the regression model.

The bark of forest trees has been found to swell somewhat during rain (e.g. B u r g a n 1971). This swelling seems not to be of importance in the case of Scots pine (H u i k a r i and P a a r l a h t i 1967). Consequently, the free-hand fitting procedure described above is likely to be unbiased also from this point of view.

4. RESULTS

A. The relationship between stem circumference and soil moisture tension

In the following regression analysis, the deviation of the observed circumference value from the reference curve (see Fig. 1) is used as the dependent variable (y), and soil moisture tension (x_1) as the independent variable. The regression equation (3) is obtained.

$$y = 0.661 - 0.00675\, x_1 \qquad r = 0.936,\ R^2 = 0.876 \tag{3}$$

Soil moisture tension, according to equation (3), explains almost 88 per cent of the variation of stem circumference. Examining the residuals plotted against soil moisture tension (x_1) (Fig. 2), it can be concluded that the quadratic term of x_1 ($=x_1^2$) probably improves the model (D r a p e r and S m i t h 1966, p. 91). By adding x_1^2, the following equation (4) is obtained:

$$y = 0.846 - 0.0120\, x_1 + 0.0000253\, x_1^2, \qquad R^2 = 0.908 \tag{4}$$

The model now explains over 90 per cent of the variation of stem circumference. As can be seen from Fig. 4, it is apparent that the coefficient of determination (R^2) can no longer be significantly increased without adding further independent variables to the model. The examination of the

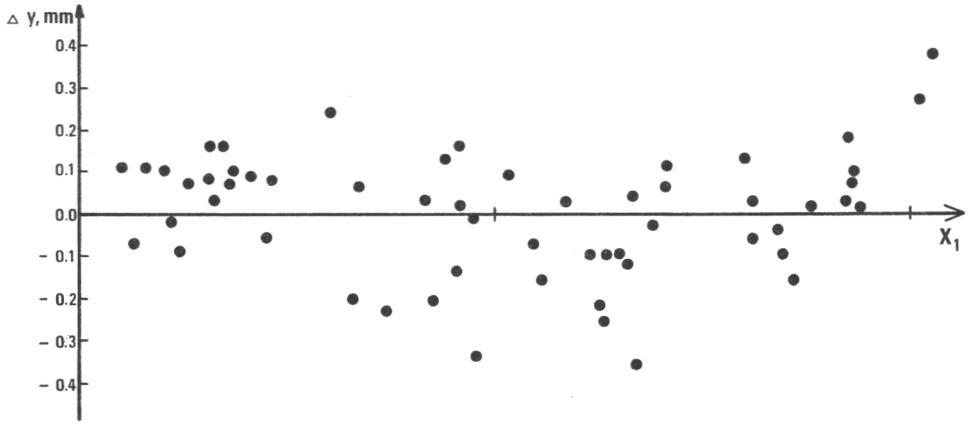


Figure 2. Residuals of model (3) plotted against soil moisture tension (x_1).

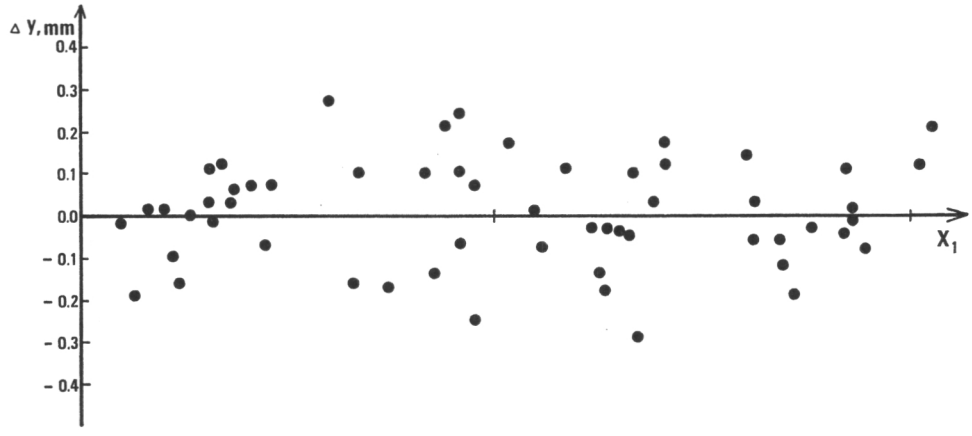


Figure 3. Residuals of model (4) plotted against soil moisture tension (x_1).

residuals suggests the same (Fig. 3). As interest is focused on the relationship between soil moisture tension and stem circumference, it is rational to add only such variables to the model that may be expected to have an influence on this relationship. This question is treated in greater detail in the following.

B. Sources of error

No recording device being available, elimination of circumference changes caused by the diurnal rhytm of transpiration may have been partially unsuccessful. It is possible that the diurnal circumference maximum had already passed when the measurement was performed. To correct this hypothetical error, the saturation pressure deficit of air at the measuring moment, calculated from thermohygrograph records, is introduced into the model as an independent variable. Saturation pressure deficit is assumed to be a measure of the transpiration conditions of the morning hours. The greater the deficit, the greater is the possibility that stem shrinkage was already going on when the circumference was measured.

In spite of the moist site, it is also possible that there were nights in the course of the observation period during which the recovery of the water deficit from the previous day was incomplete. In these cases, stem circumference had not reached its diurnal maximum when the measurement was made. This error might be partly corrected by taking into consideration the potential evapotranspiration (P e n m a n 1956) of the day before, which, in addition to soil moisture, is the most significant factor contributing to water deficits. However, the weather variables required for the calculation of potential evapotranspiration were not measured, so this

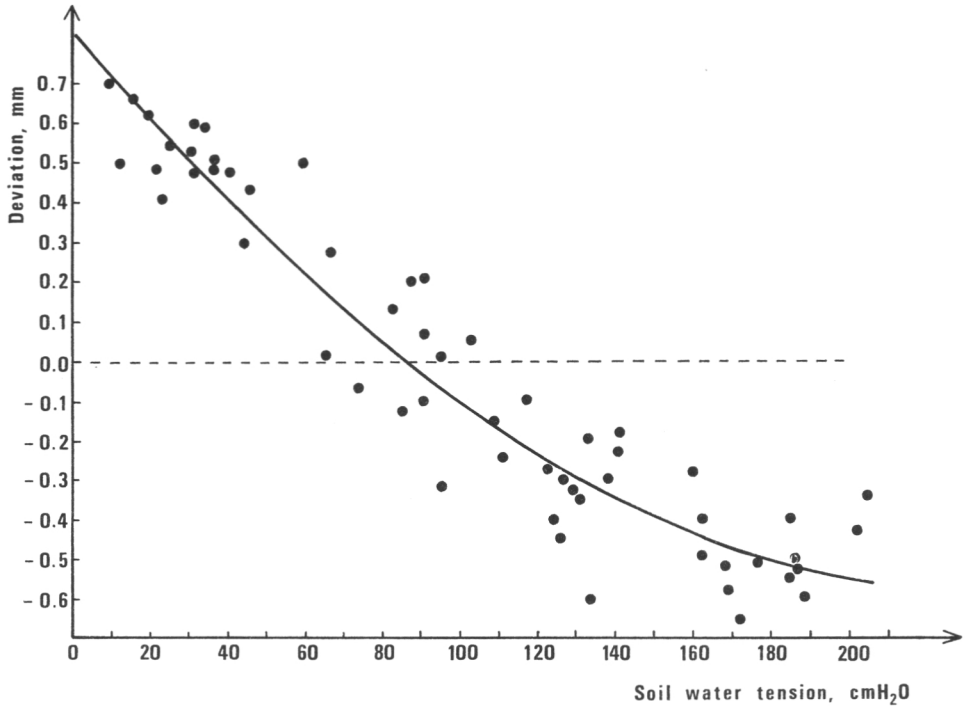


Figure 4. Deviations of the circumference observations from the reference curve plotted against soil moisture tension.

possibility is excluded here. In the following analysis, evaporation values recorded at a distance of approx. 30 km from Vilppula are used (class A evaporation pan).

For simplicity, the quadratic term of soil moisture tension, which increased the coefficient of determination by only 3 per cent, is omitted from the regression model. When saturation pressure deficit (x_2) and evaporation of the previous day (x_3) are taken as new independent variables in the model, the following regression equations are obtained:

$$(5) \qquad y = 0.689 - 0.00675\, x_1 - 0.000102\, x_2, \qquad R^2 = 0.879$$

$$(6) \qquad y = 0.703 - 0.00660\, x_1 - 0.000175\, x_3, \qquad R^2 = 0.879$$

$$(7) \qquad y = 0.719 - 0.00662\, x_1 - 0.0000854\, x_2 - 0.000148\, x_3, \qquad R^2 = 0.882$$

Although the signs of both x_2 and x_3 indicate that errors of the kind mentioned above may have occurred, the variables are not statistically

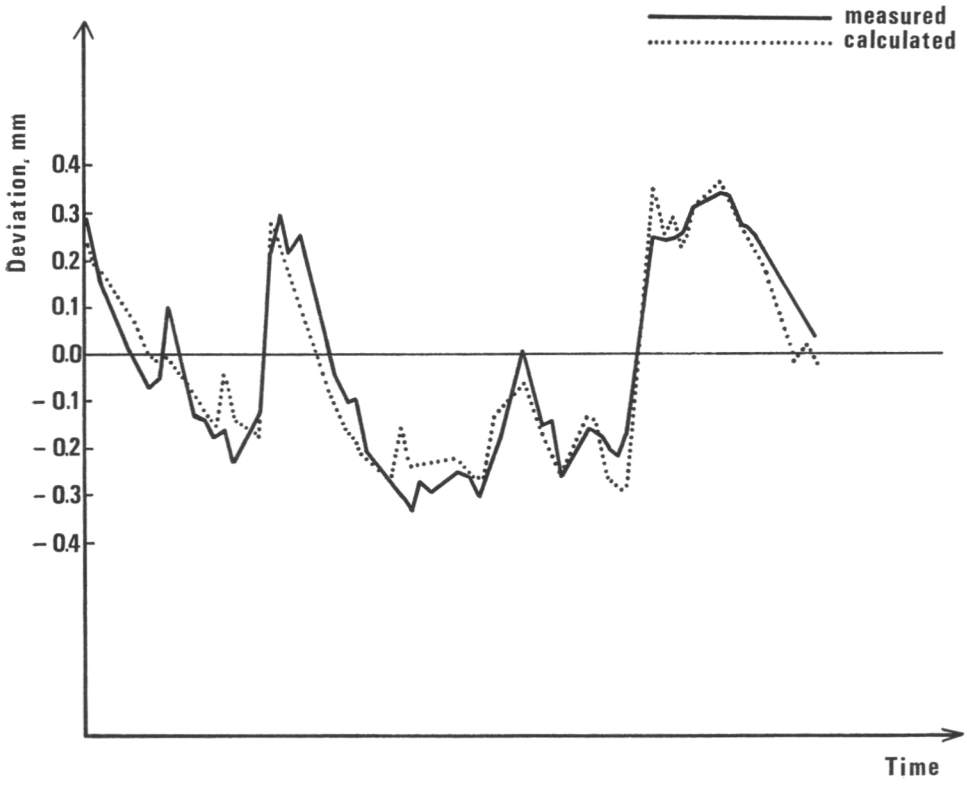


Figure 5. The deviations of the measured and the calculated circumference values from the reference curve plotted against time.

significant in any one of the equations. The coefficient of determination has increased by only 0.3—0.6 per cent compared with equation (3). Consequently, it seems that most of the stem circumference observations have been made when the circumference has been close to its diurnal maximum. Some individual observations may be erroneous, but as can be seen from Fig. 4, the variance of the y-variable about the regression curve is relatively homogeneous, which means that there is no basis for omitting observations from the material.

C. Correcting the circumference observations by means of the regression model

In the material analysed, the interdependence of soil moisture tension and stem circumference must be regarded as close enough to permit its use for elimination of the effect of soil moisture change. This is suggested

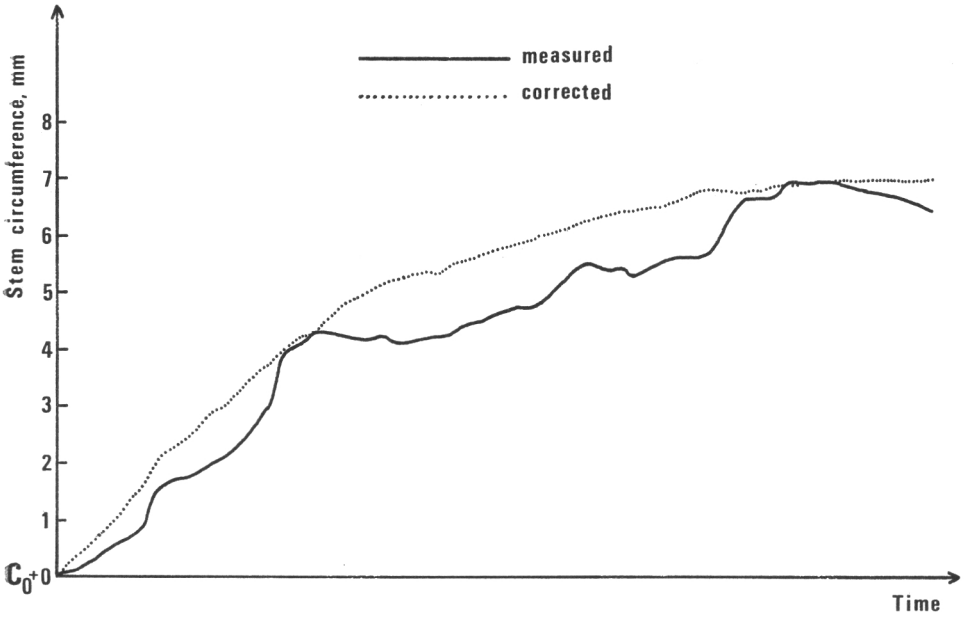


Figure 6. Measured and corrected stem circumference as functions of time. C_0 = stem circumference at the beginning of the measurement period.

also by Fig. 5, in which the deviations of the measured circumference values and those calculated by the regression equation (4) from the reference curve are illustrated.

When the cumulative growth curve of the experimental trees (Fig. 1) is corrected by equation (4) to correspond to a standard soil moisture tension (100 cm H_2O), a growth curve is obtained (Fig. 6) which still includes the daily variation of cambial growth and the variation caused by errors of measuring methods and methods of analysis.

It seems that if the relationship between environmental variation and daily circumference growth is studied, the corrected curve offers a considerably better basis for an analysis than the original cumulative growth curve, in which most of the variation is likely to be caused by a factor independent of growth.

5. DISCUSSION

Drained swamps are sites in which the pine root system usually is considerably closer to the soil surface than in mineral soil. Although the surface layer of peat does not seem to get nearly as dry as the surface layer of mineral soil, the high rate of moisture variation is obviously the reason

for the fairly marked variation in stem circumference of the Scots pines examined. The circumference of pines growing in mineral soil is probably equally dependent on the moisture of the root layer as that of pines growing on peat. However, as the root layer usually is much deeper in mineral soils, moisture variations in the uppermost layers are perhaps not of the same importance as in peat soils.

The relationship between the daily diameter growth of trees and environmental factors has been the subject of considerable research (review e.g. K o z l o w s k i 1971), but the effect of moisture variation in the root layer on stem diameter seems to have been eliminated only once. W o r r a l (1966) studied the relationship between stem diameter and xylem sap tension of forest trees and found a very close linear correlation. He presented a correction procedure for correcting tree diameter measures for variation caused by long-term moisture changes. The same principle is applied in this study, but instead of xylem sap tension, soil moisture tension of the root layer is used. The results show that a correction is especially important if shallow-rooted trees are concerned. On the other hand, as measuring moisture changes in the root layer is relatively easy when the root system is shallow, the correction seems possible in the cases where it is most essential.

In this study, the relationship found between soil moisture tension of the root layer and stem circumference was not linear (cf. W o r r a l 1966). This is probably because the moisture of the 2—8 cm layer did not represent the moisture of the whole root layer, which, at equilibrium, is decisive for stem circumference variation.

The regression equations obtained in this study do not have any general value, since it is obvious that the parameters are dependent on tree diameter (W o r r a l 1966) and on the depth at which the moisture tension of the root zone is determined. Equations of general applicability can probably be obtained only by W o r r a l's procedure, in which xylem sap tension instead of soil moisture tension is used.

Acknowledgements. I wish to express my sincere gratitude to Professor Olavi H u i k a r i, whose experiments on the ecology of forest trees carried out at the Department of Peatland Forestry, Finnish Forest Research Institute, made this study possible.

In addition, I wish to thank Mr. Eero P e l k o n e n for performing the field measurements in an excellent manner, the Society of Forestry in Finland for financial support, and Dr. Matti L e i k o l a, Department of Silviculture, Finnish Forest Research Institute, for many valuable suggestions and helpful advice during the course of the study.

REFERENCES

Ahti, E. 1971. Maaveden jännityksen mittaamisesta tensiometrillä. Summary: Use of a tensiometer in measuring soil water tension. Folia Forestalia 112.

Brülhart, A. 1969. Jahreszeitliche Veränderungen der Wasserbindung und der Wasserbewegung in Waldböden des schweizerischen Mittellandes. Mitt. Schweiz. Anst. Forstl. Versuchsw. 45.

Burgan, R. E. 1971. Variations in diameter measurements of *Robusta eucalyptus* due to swelling and shrinking of bark. USDA For. Serv. Note PSW-244.

Draper, N. R. & Smith, H. 1966. Applied Regression Analysis. New York—London—Sydney.

Ezekiel, M. 1950. Methods of correlation analysis. 2. ed. New York.

Friedrich, J. 1897. Über den Einfluss der Witterung auf den Baumzuwachs. Mitt. Forstl. Versuchsw. Österr. 22.

Heikurainen, L. 1955. Über Veränderungen in den Wurzelverhältnissen der Kiefernbestände auf Moorböden im Laufe des Jahres. Acta For. Fenn. 65.2.

Hillel, D. 1971. Soil and Water. Physical Principles and Processes. New York—London.

Huikari, O. & Paarlahti, K. 1967. Results of field experiments on the ecology of pine, spruce and birch. Commun. Inst. For. Fenn. 64.1.

Kozlowski, T. T. 1971. Growth and Development of Trees. Vol. II. New York—London.

Leikola, M. 1969. The effect of some climatic factors on the daily variations in stem thickness of Scots pine. Acta Bot. Fenn. 6: 173—181.

Paavilainen, E. 1966. Maan vesitalouden järjestelyn vaikutuksesta rämemännikön juurisuhteisiin. Summary: On the effect of drainage on root systems of Scots pine on peat soils. Commun. Inst. For. Fenn. 61.1.

Penman, H. L. 1956. Estimating evapotranspiration. Trans. Amer. Geoph. Un. 37.

Slatyer, R. O. 1967. Plant-Water Relationships. London.

Worral, J. 1966. A method of correcting dendrometer measures of tree diameters for variations induced by moisture stress change. For. Sci. 12: 427—429.

Seloste

MAAN KOSTEUSMUUTOSTEN AIHEUTTAMAN PAKSUUSVAIHTELUN ELIMINOIMINEN MITATTAESSA PUIDEN PÄIVITTÄISTÄ PAKSUUSKASVUA

Mitattaessa puiden päivittäistä paksuuskasvua rungon kosteusmuutoksista johtuva paksuusvaihtelu saattaa peittää kasvusta aiheutuvat paksuuden muutokset. Transpiraation vuorokausirytmin aiheuttama vaihtelu voidaan eliminoida tekemällä mittaukset samaan vuorokaudenaikaan. Näin menetellen ei kuitenkaan voida eliminoida pitemmän ajan kuluessa tapahtuvien kosteusmuutosten aiheuttamaa puun paksuuden vaihtelua. Tällaista vaihtelua aiheutuu esimerkiksi maan kosteuden muutoksista.

Käsillä olevassa tutkimuksessa osoitetaan, että suomäntyjen ympärysmitan ja juurikerroksen kosteuden välinen riippuvuus on niin kiinteä (korrelaatiokerroin 0.936), että juurikerroksen kosteusarvoja voidaan käyttää ympärysmittalukemien korjaamiseen niin, että ne vastaavat samaa kosteutta.

Tutkittaessa puiden paksuuskasvun ja ympäristötekijöiden välistä riippuvuutta em. tavalla korjattu puun kasvua kuvaava käyrä näyttää tarjoavan analyysille huomattavasti paremman lähtökohdan kuin alkuperäinen, korjaamaton käyrä. Tämän tutkimuksen mukaan yli 90% puun ympärysmitan päivittäisestä vaihtelusta johtui sellaisista maan kosteuden muutoksista, joilla ei ole mitään tekemistä paksuuskasvun kanssa.

RELEASE AND GERMINATION OF BASIDIOSPORES OF *MELAMPSORA PINITORQUA* (Braun) Rostr. AND *M. LARICI-TREMULAE* Kleb. AT VARIOUS TEMPERATURES

TIMO KURKELA

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0067-6

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

INTRODUCTION

Melampsora pinitorqua (Braun) Rostr. causes twist rust of pines. It is known to occur throughout almost the whole of Europe and southwestern Asia (Viirok 1931, Karu 1937, Regler 1957, Klingström 1963, Tsanova 1967, Longo, Moriondo, and Naldini 1970, Krutov 1971). De Bary (1863) was the first to describe the disease on pine. Rostrup (1884) established that the pathogen concerned, the rust *Melampsora pinitorqua*, infects, by means of its aeciospores, the leaves of aspen (*Populus tremula* L.), on which the uredial and telial states of the fungus develop. When it is found on the leaves of aspen, it is extremely difficult, if not even impossible, to distinguish on the basis of morphological characteristics, *M. pinitorqua* from other *Melampsora* species occurring on this tree species. The identification keys which have been worked out for these fungi (e.g. Hennebert 1964) are difficult to use because of the great degree of overlappning of the characteristics used for determination. For this reason the rusts of aspen are generally known by the collective name *Melampsora populnea* (Pers.) Karst. (Hylander, Jørstad, and Nannfeldt 1953, Wilson and Henderson 1966).

In addition to *Melampsora pinitorqua*, at least three other species of *Melampsora* may infect the leaves of aspen in Finland (Buchwald, Kujala, Roll-Hansen, Björkman, and Käärik 1961). This conclusion can be drawn, for example, on the basis of recordings of the aecial states of the rusts concerned (Liro 1906, 1908, Hylander, Jørstad, and Nannfeldt 1953). In the vicinity of larch plantations, aspen is also infected by *M. larici-tremulae* Kleb., a rust which, on the other hand, occurs on the needles of larch (Liro 1906, Kujala 1950). Among the species belonging to the species complex *M. populnea*, *M. pinitorqua* is the one of the greatest economic importance because of the damage caused by it in young pine stands. The first one to write about the pine twist rust in Finland was Furuhjelm (1898). More recently, the importance of the rust with regard to young pine stands has been studied by Kangas (1937) and Kujala (1950).

In the spring, the telia of *M. pinitorqua*, which have overwintered on aspen leaves lying on the ground under the snow cover, produce basidio-

spores, which infect the growing shoots of young pine trees. A presupposition for infection is consequently that there is some aspen brush growing in the pine stands (cf. Rostrup 1884, Hartig 1885). Investigations concerning the dispersal of the basidiospores of *M. pinitorqua* and the occurrence of the *Melampsora* rust in the vicinity of aspen brush have indicated that the probability of an infection decreases rapidly with increasing distance from the aspens (Schafranskaja 1940, Rennerfelt 1953, Kardell 1962, Durrieu 1967). *Melampsora* rust epidemics are highly dependent on the weather conditions. A positive correlation exists between the occurrence of the rust and the frequency of precipitation in the early summer (Sylvén 1918, Moriondo 1962, Klingström 1963, Longo, Moriondo, and Naldini 1970). The influence of temperature on the germination of teliospores has been studied by Schafranskaja (1940), Klingström (1963) and Longo, Moriondo, and Naldini (1970).

During the 1960s, *M. pinitorqua* was a source of substantial increment losses in young pine stands all over Finland. At that time, a proposition was consequently made by the representatives of practical forestry that the disease be thoroughly studied in order to gain a better understanding of the epidemics as well as to find methods for its control. As a result of the proposition, the investigation on *M. pinitorqua* and related species was initiated at the Finnish Forest Research Institute. The present report is concerned with a part of this project, and deals with basidiospore production in *Melampsora pinitorqua* and *M. larici-tremulae* at different temperatures, the effect of temperature fluctuations on basidiospore production and the germination rate of the basidiospores at different temperatures.

MATERIAL AND METHODS OF STUDY

Sampling

Sampling was done on aspen leaves which had overwintered on the ground under the snow cover, and on which teliospores of *Melampsora pinitorqua* were found. Samples were collected from various localities within a region in which pine, in addition to aspen, is the only host of aspen rust. Sampling was performed in young pine stands which had been severely damaged by the rust. The sites concerned were all surrounded by forest; this diminished the possibility of the local aspen population becoming infected by spores of *Melampsora* originating from other localities.

The germination percentage of the teliospores produced by the samples was assessed by means of petri dish experiments. A total of one hundred circular peaces with a diameter of four millimeter were punched out from the leaves forming one sample, moistened in water and placed on the inside of the lid of a petri dish. Water was added to the petri dish to keep the air moist during the course of germination, which took place in incubation boxes at 15 °C. After incubation for two days, the germination percentage of the teliospores was determined by counting the pieces of leaves on which either basidia or basidiospores had formed. The presence of *Melampsora pinitorqua* in the samples was established by infecting pine seedlings in the greenhouse with basidiospores produced by the teliospores as described by M o r i o n d o (1961).

The samples in which teliospore germination was highest (90—100 %) and which led to the formation of aecia on pine in infection experiments were chosen for use in the studies concerning basidiospore production and germination. The samples concerned had been collected on May 11, 1967, at Mäntyharju, and on May 8, 1968, at Jalasjärvi.

For the study of *Melampsora larici-tremulae*, aspen leaves which had wintered under the snow cover and which contained teliospores of the rust concerned were collected on May 9, 1968, at Vähäkyrö. Sampling was done in an aspen thicket which had been infected in the preceding summer using aecia obtained from the needles of larch. The teliospores concerned were not used for infection experiments, but a larch plantation

which had been established in the area in 1967 as well as the young pine trees, both natural and planted, which occurred on the site, were examined in the summer of 1968. Rust was found in abundance on the needles of the larch trees, but the young pines were free from infection.

Basidiospore production by telia

The rate of basidiospore release at various temperatures was studied using an apparatus consisting of a petri dish which was rotated by means of the clockwork mechanism of a thermograph, on top of which it was located (B e g a 1959, P o w e r s and R o n c a d o r i 1966). The clock turned the lower part of the petri dish, which had been filled with 2 % water agar, around its vertical axis. The lid had been placed in a fixed position over the dish in such a way that the movement of the latter could take place without hindrance. The fruiting body of the fungus — in this case a piece of an aspen leaf bearing telia of *Melampsora* — was attached to the lid of the petri dish, and kept moist by means of a piece of agar or condensed water. The spores which were released from the telia fell down onto the agar and could be counted under the microscope at the desired time intervals.

The clocks used in the study made a full turn in a week. The inner diameter of the petri dishes used was eleven centimeter. The dish was placed on the clockwork mechanism so that its middle point, which had been marked on the bottom of the dish, was exactly above the axis of the clock. The middle point was also used when the petri dish was put in place under the microscope for spore counting. The wall of the petri dish was cut so that its external height was one centimeter. When the petri dish was filled up with agar, the distance between the lid and the surface of the agar, through which the spores had to fall, was the shortest possible (about three millimeter). Filling up the dish to the brim with agar also made it possible to count the spores even at the very edge of the dish.

The pieces of aspen leaves used for the study were wedgeshaped. After moistening in water, they were placed radially in the lid of the petri dish. The pieces, each of which bore several telia, had a length of about 2 cm, their largest width being 1.5 mm. The petri dish was turned by the clockwork mechanism at a rate of 2 mm/h at the edge of the dish. Two apparatuses were used simultaneously, and the experiment was repeated once at each temperature concerned. Thus, the study of the release of spores had four replications. The dishes were turned for one week at a time; after which time the experiments were discontinued, or, as in the case of some experiments at low temperatures, a new dish filled with agar was placed

in the apparatus. The maximum time covered by a single experiment was 340 hours.

The basidiospores which had been deposited on the surface of the agar were counted at intervals corresponding to two hours. A 150× magnification was used in counting. The number of spores corresponding to each counting time was obtained from 20 observation fields, the diameter of which was 0.5 mm. The accuracy of determination of the release time was dependent on the rate of movement of the piece of leaf under study as well as on its width and the diameter of the observation field, being about ± 1 h when the vertical dispersion of spore deposition was not taken into consideration. Thus, the total number of spores which were recorded at each time of counting was representative of the average number of spores that had been released during a 2 h period.

The temperatures at which the experiments were performed ranged from +5 — +25 °C at intervals of 2.5 °C. During the course of the experiments, the clockwork apparatuses were kept in plastic bags in incubation boxes, the temperature of which was regulated by means of a thermostat which gave an accuracy of ±1.5 °C. The temperature prevailing in the box during the experiment was registered using a thermograph. The temperature prevailing in the petri dishes was determined by means of an electric thermometer (Ellab TE 3) and a needle-shaped thermocouple (K 8), which was pushed into the petri dish through a hole in the lid in such a way that the piece of aspen leaf which had been placed in the lid was touched by its tip. During the course of the experiment, the temperature was measured at least twice a day. The accuracy of the temperature in the dish was established at ±0.2 °C. In order to ensure that sufficient moisture was present during the experiments, some water was added to the plastic bags in which the apparatuses were kept.

Germination of the basidiospores

Germination of the basidiospores of *Melampsora pinitorqua* and *M. larici-tremulae* was studied at the same temperatures as the production of these basidiospores. Germination was carried out in an apparatus which had been attached to a microscope, and in which the temperature of the germination bed (2 % water agar) was regulated by means of water passed through a chamber situated under it. The temperature of the water used for cooling or heating, in turn, was regulated by a thermostat (Braun Thermomix II). During the course of the experiment its temperature was determined using a thermocouple (Ellab TE 3 and K 8). The highest degree of variation which was recorded during the experiment was ±0.5 °C.

In order to decrease the variations in temperature at the surface of the agar, the germination bed was covered with a microscope cover glass so that an air space 2 mm thick remained between it and the agar. The microscope with the attached apparatus was kept in a box made out of expanded polystyrene.

Release of the basidiospores onto the agar was permitted for half an hour from telia which, moistened with water, had been preincubated for 24—48 hours at a temperature of 13 °C. When release was discontinued, the agar was covered with a glass plate as described in the foregoing. The spores were examined using 170× magnification. The first examination under the microscope was carried out immediately after deposition, and the subsequent examinations at 15 min. intervals in the case of temperatures exceeding 10 °C, and at 30 min. intervals in the case of temperatures of 10 °C and less. The microscopic examinations were continued until 90 % of the spores had germinated.

The spores were considered as having germinated when, in addition to the sterigma, there was a swelling in their wall. If the sterigma of a spore was not visible, the spore was considered as having germinated if the swelling in the spore wall was either longer or wider than the sterigma observed on other spores. Each examination covered at least 100 spores. The experiments were carried out as two replications, in June and in September. The aspen leaves containing telia were kept dry during the time of the study in plastic bags which were stored at +3 °C.

RESULTS

Rate of spore production by telia

Basidiospores were released from the telia of *Melampsora pinitorqua* at all temperatures covered by the experiment (Figs. 1 and 2). The release of spores was studied from material collected in two different localities. In the case of the samples collected in the spring of 1967 at Mäntyharju, no basidiospore release took place at 5 °C when the sample was studied in the clockwork apparatus. In the case of the sample obtained in the spring of 1968 from Jalasjärvi, on the other hand, basidiospores were obtained at this temperature. The number of basidiospores released at temperatures of 5—10° and of 25 °C was relatively small, ranging from about 500 to 5 000. Due to the small numbers of spores counted, the relative variation in the results between separate countings was large (Figs. 1 and 2). At temperatures of 12.5—22.5 °C, release was more regular and even. The largest number (10 000—30 000) of spores was recorded at temperatures of 15—20 °C. The numbers of spores recorded in the case of separate experiments are not fully comparable, however, because there could be great differences in the basidiospore producing capacity even of adjacent telia. For this reason it was not possible to standardize the samples before they were used in the experiments.

Spore release started the sooner, the higher was the incubation temperature, although, in the case of the experiment performed at 25° C, release was somewhat delayed in comparison with the results obtained at temperatures of 20—22.5 °C. Table 1 shows the times when release was initiated and reached its maximum. In the case of temperatures of 10—5 °C, maximum numbers of spores were counted after 2.5—3 days of incubation, the corresponding time being 1—1.5 days at temperatures of 20—12.5 °C, and less than 24 hours at temperatures exceeding 20 °C. The curves presented in Figs. 3 and 4 show the incubation periods at which 10, 50 and 90 % of the total numbers of counted spores had been released. The curves were drawn using the model $y = A + Bx + C \log x$. The coefficients used were statistically significant, the correlation coefficient ranging from

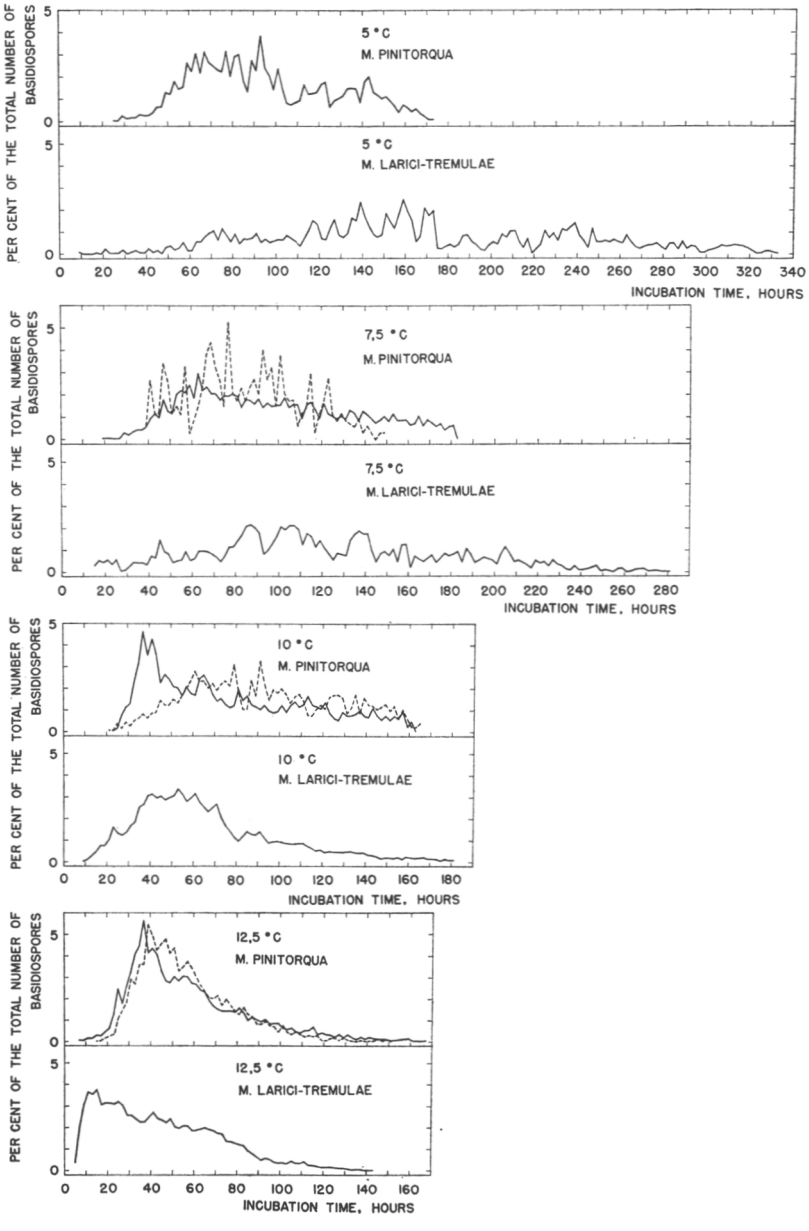


Fig. 1. Basidiospore release from telia of *Melampsora pinitorqua* and *M. larici-tremulae* at temperatures of +5 — +12.5 °C. Each line shows the mean of two replications.

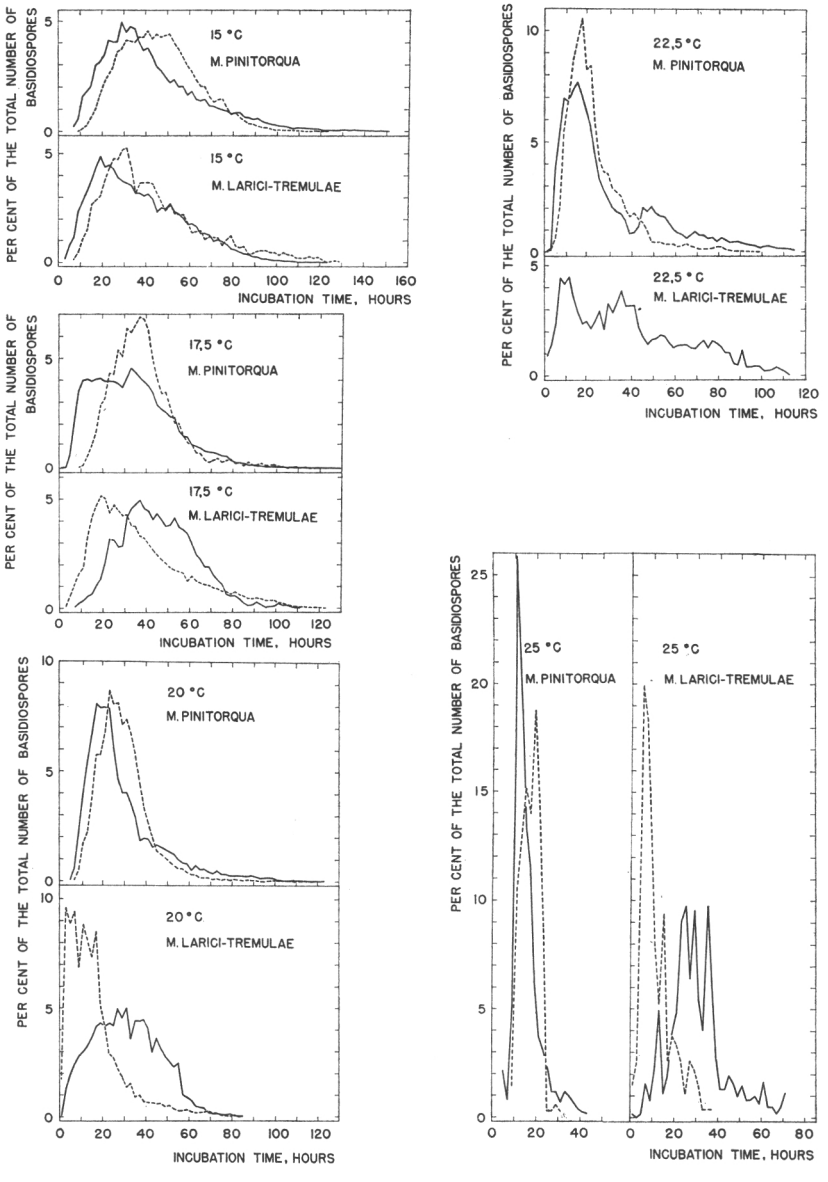


Fig. 2. Basidiospore release from telia of *Melampsora pinitorqua* and *M. larici-tremulae* at temperatures of +15 — +25 °C. Each line shows the mean of two replications.

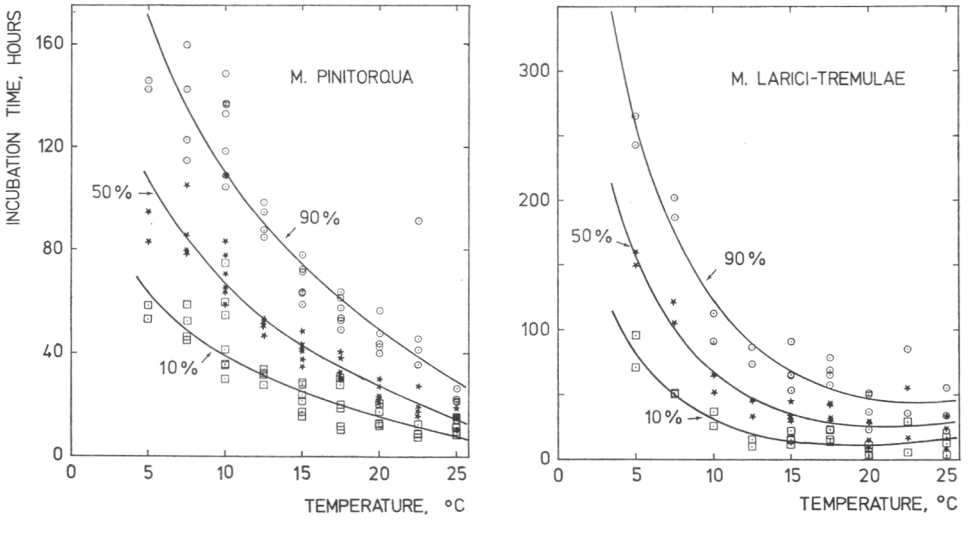
Table 1. Average incubation times required at various temperatures for the initiation of basidiospore release from telia of *Melampsora pinitorqua* and *M. larici-tremulae* and for maximum release to be reached.

	M. pinitorqua			*M. larici-tremulae*		
Temperature	n	Initiation	Max.	n	Initiation	Max.
°C		Hours				
5.0	2	29	75	2	21	164
7.5	4	32	74	2	30	94
10.0	7	27	57	2	11	50
12.5	4	14	38	2	5	13
15.0	6	9	37	4	6	25
17.5	6	10	29	4	10	29
20.0	5	8	24	4	1	19
22.5	4	2	18	2	1	30
25.0	5	8	15	3	5	20

n = number of experiments

0.88 to 0.93 in the case of *Melampsora pinitorqua*, and from 0.93 to 0.96 in the case of *M. larici-tremulae*. The hourly maximum number of spores was obtained in the case of all temperatures studied, after the time when 10 %, and in most cases, before the time when 50 % of the spores had been released.

In the case of *Melampsora larici-tremulae*, basidiospore release followed a similar pattern to that of *M. pinitorqua*. Some differences could be ob-



Figs. 3 and 4. Time required for 10, 50, and 90 per cent basidiospore release from telia of *Melampsora pinitorqua* and *M. larici-tremulae*. The lines were obtained from the model $y = A + Bx + C \log x$.

served, however. In the case of temperatures of 10—20 °C, basidiospore release initiated and reached its maximum earlier in *M. larici-tremulae* than in *M. pinitorqua;* in the case of temperatures below 10 °C and over 20 °C, however, release reached its maximum later in *M. larici-tremulae.*

On the basis of the results concerning the numbers of basidiospores released at different temperatures, the temperature range from 12.5 to 22.5 °C can be considered as being optimum with regard to basidiospore production in both of the fungi studied.

Effect of changes in temperature during incubation on the release of basidiospores

The effect of changes in the temperature during incubation on basidiospore release was studied only for *Melampsora pinitorqua.* Fig. 5 shows the effect of preincubation at 5 and at 25 °C. The numerical values forming the basis of the curves indicate the number of spores released during 2 h periods in proportion to the maximum recorded. The experiment was per-

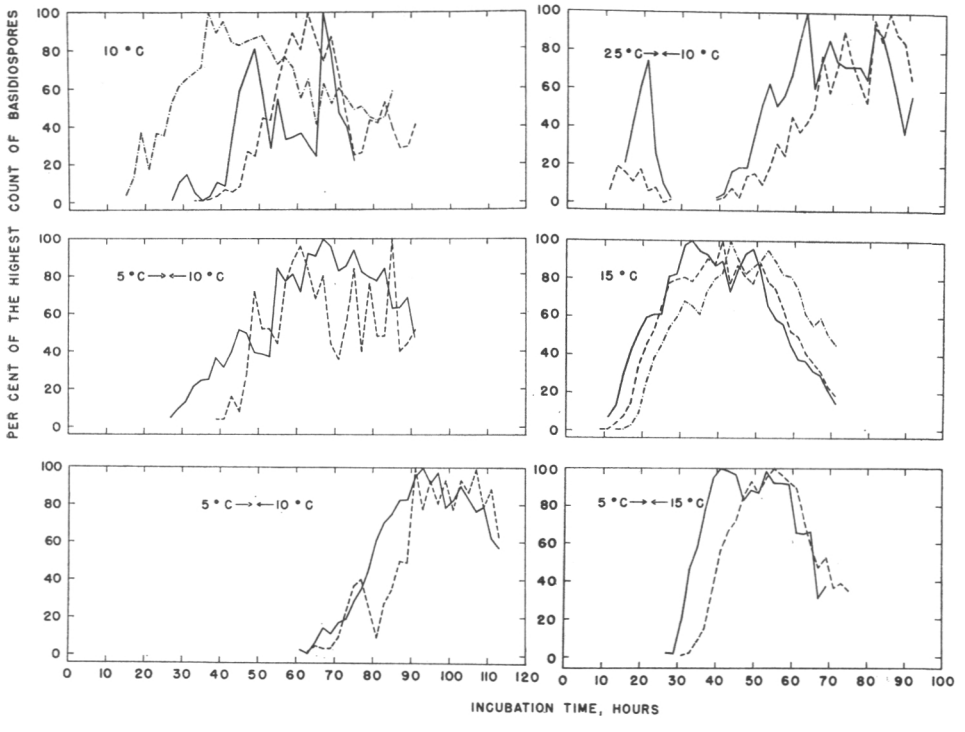


Fig. 5. Effect of changes in temperature during incubation on the basidiospore release from telia of *Melampsora pinitorqua.* Each line shows the mean of two replications. The arrows indicate the time, when incubation temperature was changed.

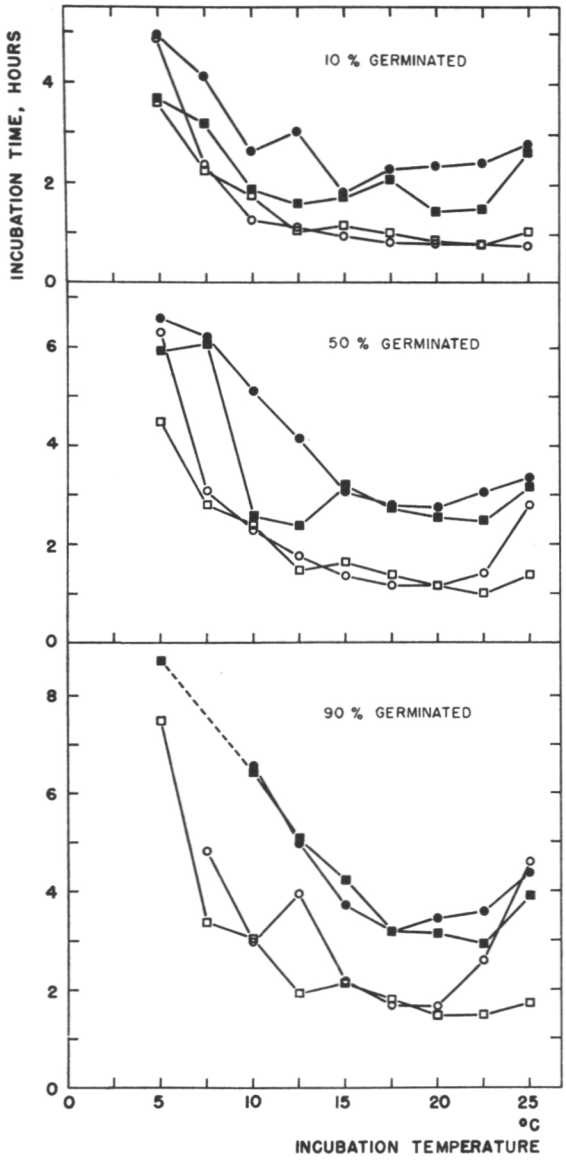


Fig. 6. Germination rates of the basidiospores of *Melampsora pinitorqua* (squares) and *M. larici-tremulae* (circles). Open symbols: Experiments performed in June. Filled symbols: Experiments performed in September after keeping the telia at +3 °C for about three months.

formed on the sample from Mäntyharju for which no spore production was recorded at 5 °C. When the temperature, after preincubation for 1—2 days at 5 °C, was raised to 10 °C, spore release was initiated within about 10 hours. In the case of the control, in which incubation was carried out at 10 °C from the very start, spore release was initiated in 15—30 hours after the start of incubation. When the temperature was raised from 5 to 15 °C, spore release was initiated in about seven hours. Incubation at 25 °C started spore release; however, when the temperature was lowered from this level to 10 °C, release was interrupted for about ten hours. Consequently, incubation at 25 °C did not destroy the telia, and they produced basidiospores in the usual way at the lower temperature.

Germination of basidiospores

Fig. 6 presents the results obtained from the germination experiments. In the case of the first series, germination was clearly faster than in the case of the second series. The difference, about 1—1.5 hours, might have been due to the length of time for which the samples were stored. As the germination tests of the first series took place at approximately the same time as *Melampsora* infection occurs in nature on pine and larch, the results obtained from this series can be considered as being more reliable than those of the second series.

At temperatures exceeding 12.5 °C, 10 % of the spores germinated in less than an hour. At temperatures of 17.5—20 °C, which gave the fastest germination rate, as much as 90 % of the spores germinated in less than two hours. The optimum range with regard to the temperature of basidiospore germination seemed to be narrower in the case of *Melampsora pinitorqua* than in *M. larici-tremulae*. The clearest differences between the fungi concerned were recorded at temperatures above optimum, however.

DISCUSSION

The length of the incubation time required to initiate basidiospore release in *Melampsora* is clearly dependent on the stage of maturity of the telia. K l i n g s t r ö m (1963) established that there is a clear variation in the germinating activity of telia in *M. pinitorqua* at different times during the growing season. For example, no basidia at all were formed on samples collected in the early spring and in the fall. D i e t e l (1912, 1921) and R e g l e r (1957), for *Melampsora*, and K l e b a h n (1914), for certain species of the genus *Puccinia*, found a variation in the germinating activity of teliospores that had overwintered which they attributed to an unevenness in the gradual maturing of the spores due to their alternating moistening and drying. It seems that the teliospores, when they become moist and dry several times, are able to free themselves from certain germination-inhibiting agents. In addition to the variation in moisture conditions, a factor of importance for the germination of spores is evidently the temperature prevailing during the time when they are moist (cf. R e g l e r 1957). In addition to the variation occurring from time to time during the growing season, there is a considerable variation in the germinating activity of spores produced by individual telia of the same sample, and even between individual spores from the same telia (K l e b a h n 1904, R e g l e r 1957, K l i n g s t r ö m 1963). This variation was observed also in the present work, in which it was one of the greatest sources of errors in the comparisons performed between the results of various experiments. The fact that basidiospore release was initiated earlier in *Melampsora larici-tremulae* than in *M. pinitorqua* might have been due to differences in the stage of maturation at the time of sampling; however, there is also the possibility that the difference concerned is characteristic of these species. In the years of 1967 and 1968, for example, it was established that the needles of larch reached their full length about one month before height growth ceased in pine, and there is consequently the possibility that *M. larici-tremulae* has become adapted to producing basidiospores earlier in the spring than *M. pinitorqua*.

The range of the optimum temperature with regard to the germination of teliospores of *Melampsora* as well as basidiospore release and germi-

nation seems to be rather wide (cf. Klingström 1963, Longo, Moriondo, and Naldini 1970). A similar situation with regard to optimum temperature has been established in the case of many other rust fungi, such as *Cronartium ribicola* Fisher (Hirt 1935, van Arsdel, Riker, and Patton 1956), *C. fusiforme* Hedgc. & Hunt ex Cumm. (Siggers 1947), *C. querquum* (Berk.) Miyabe ex Shirai (Nighswander and Patton 1965) and some species of the genus *Chrysomyxa* (Gould and Shaw 1969). When the temperature rises above the optimum, the rate of the release of basidiospores is accelerated in *Melampsora pinitorqua*, but the quantity of spores produced is decreased. If the temperature is below the optimum, the rate of release of spores is slower and the total amount of spores released is smaller than at the optimum temperature. The results obtained in the present study concerning basidiospore production in *M. pinitorqua* are in conformity with the results of previous studies, for example, on *Cronartium ribicola* (Hirt 1935, Bega 1959) and *C. fusiforme* (Powers and Roncadori 1966, Snow 1968 a).

In the case of certain rust fungi, light affects teliospore germination (Neuhaus 1969). Pady and Kramer (1971), when they treated some *Gymnosporangium* species with alternating periods of lightness and darkness, were able to produce a periodicity in the basidiospore release of the fungi concerned. The daily period which can be observed in spore release may be an indication of adaption of the fungus concerned to the favorable moisture conditions created during the night by dew. Carter and Banyer (1964) found a distinct maximum in basidiospore release in *Puccinia malvacearum* Mont. at midnight during dewy nights; likewise, van Arsdel (1967) observed that basidiospores of *Cronartium ribicola* move with air currents during dewy nights. Under Finnish conditions, adaptation of *Melampsora pinitorqua* to dewy periods is probably of minor importance to the species because of the small amounts of dew which is available during the short nights in June, even in the southern parts of the country (Huovila 1968). During dewy nights the temperature is usually rather low thus limiting the release of basidiospores, and consequently, the importance of dew for the spreading of the rust. The principal importance of dew is in the fact that it may lengthen a moist spell due to rain in the evening or in the morning. According to the results obtained from the present study, a moist period of only about twelve hours at optimum temperature may be enough for the release of a considerable quantity of basidiospores, some of which will probably even be able to germinate during the same period. It is clear that infection of the shoots of pine and the needles of larch requires somewhat more time than the release and germination of the basidiospores. According to experiments carried out by Snow (1968b), a period of incubation covering at least four

hours was required after inoculation with basidiospores of *Cronartium fusiforme* before infection took place in seedlings of *Pinus elliottii* Engelm. On the basis of the results from the present study and of the literature, it seems evident that a moist period covering some sixteen hours may be enough to cause a slight *Melampsora* rust infection in young pine stands. Before a severe infection can take place, a moist period of about two days is probably required. The experiments carried out showed that maximum basidiospore release was reached under optimum temperature conditions in about two days.

Regler (1957) and Klingström (1963) have established that all telia, even when they occur on the same aspen leaves, do not germinate at the same time. For the germination of ungerminated telia or teliospores a change in the prevailing conditions is always required, for example, drying and remoistening, or a change in temperature, which was the situation in the present experiments, where temperature was lowered from 25 °C to 15 °C during incubation. Snow (1968), using *Cronartium fusiforme*, indicated that germination during a short period or at low temperatures brings the development to a certain stage, for example, to basidium formation, from which it may continue when conditions have changed so as to favor germination anew. On the other hand, direct sunlight may be destructive to the developing basidia and basidiospores (Hirt 1942).

SUMMARY

Basidiospore release from teliospores of *Melampsora pinitorqua* (Braun) Rostr. and of *M. larici-tremulae* Kleb. were studied at various temperatures by letting the spores be releashed onto a rotating petri dish. In *M. larici-tremulae* basidiospore release was somewhat faster than in *M. pinitorqua*. Optimum temperature for spore release seemed to vary between 12.5 and 20 (22.5) °C. At 5 °C basidiospore release was extremely slow, and in some cases no spores were formed at all at this temperature. With increasing temperature spore release became faster. Spore release was initiated and reached a maximum earlier and the quantities of spores that were released became larger with an increase in temperature towards the optimum.

Basidiospore release started, depending on the temperature, within 1—30 hours from the moment when the telia had been moistened, reaching a maximum before 50 % of the total quantity of basidiospores had been released. Maximum release was usually reached in 24—48 hours. At temperatures above the optimum, spore release became faster, but the quantities of basidiospores produced were smaller than at optimum temperature. Germination of telia was rather poor at 25 °C; when the temperature was lowered to 10 °C, however, the same telia produced normal quantities of basidiospores.

Basidiospores were germinated on water agar. The optimum temperature with regard to their germination seemed to be at the same level as for spore release. At the optimum temperature more than 90 % of the total number of basidiospores germinated within two hours.

Storing the teliospores for a long time in a refrigerator made germination of the basidiospores produced by them slower, although the basidiospore production seemed to be unaffected.

Aknowledgements. The author is indebted to Mrs. Inkeri E r j a l a and Mr. Simo L e i n o n e n for technical assistance and to Mr. Karl-Johan A h l s v e d for translation of the manuscript.

REFERENCES

Arsdel, E. P. van. 1967. The nocturnal diffusion and transport of spores. Phytopathology 57, 1221—1229.

Arsdel, E. P. van, A. J. Riker, and R. F. Patton. 1956. The effects of temperatures and moisture on the spread of white pine blister rust. Phytopathology 47, 307—318.

Bary, A. de. 1863. Über einen neuen, in der Mark und in Hannover beobachteten, der Kiefer verderblichen Pilz, Caeoma pinitorquum. Mon. Ber. K. Preuss. Akad. Wiss. Berlin 1863, 624—640.

Bega, R. V. 1959. The capacity and period of maximum production of sporidia in Cronartium ribicola. Phytopathology 49, 54—57.

Buchwald, N. F., V. Kujala, F. Roll-Hansen, E. Björkman, and A. Käärik. 1961. Lists of parasitical fungi and of hosts of such fungi. Denmark, Finland, Norway, Sweden. I. Pinus, Populus, Quercus. Medd. norske Skogsforsøksv. 17, 5—36.

Carter, M. V. and R. J. Banyer. 1964. Periodicity of basidiospore release in Puccinia malvacearum. Australian J. Biol. Sci. 17, 801—802.

Dietel, P. 1912. Versuche über die Keimungsbedingungen der Teleutosporen einiger Uredineen. Cbl. Bakt. Parasitenk. u. Infektionskrankh. II, 31, 95—106, II, 35, 272—276.

—»— 1921. Versuche über die Keimungsbedingungen der Teleutosporen einiger Uredineen, IV. Cbl. Bakt. Parasitenk. u. Infektionskrankh. II, 54, 215—219.

Durrieu, G. 1967. Note sur l'epidemiologie de la rouille tordeuse du pin: Melampsora pinitorqua (Uredinales). Trav. Lab. For. Toulouse, Tom. 6, 4,2. 8 pp.

Furuhjelm, J. F. 1898. Caeoma (Melampsora) pinitorquum männyssä. Metsänystävä 1898, 8/9, 133—137.

Gould, C. J. and C. G. Shaw. 1969. Spore germination in Chrysomyxa spp. Mycologia 61, 694—717.

Hartig, R. 1885. Die Aspe (Populus tremula) als Feind der Kiefern und Lärchenschonungen. Allg. Forst- u. Jagdz. 61, 326—327.

Hennebert, L. 1964. L'identification des rouilles du peuplier. Agricultura (Louvain) II, 12, 661—670.

Hirt, R. R. 1935. Observations on the production and germination of sporidia of Cronartium ribicola. Bull. N. Y. State Coll. For. Syracuse Univ. Techn. Publ. 46. 25 pp.

—»— 1942. The relation of certain meteorological factors to the infection of eastern white pine by the blister rust fungus. Bull. N. Y. State Coll. For. Syracuse Univ. Techn. Publ. 59. 65 pp.

Huovila, S. 1968. On the amount of dew in Finland. Geophysica 10, 75—80.

Hylander, N., I. Jørstad, and J. A. Nannfeldt. 1953. Enumeratio uredinearum scandinavicarum. Opera Bot. 1,1. 102 pp.

Kangas, E. 1937. Tutkimuksia mäntytaimistotuhoista ja niiden merkityksestä. Comm. Inst. For. Fenn. (1937—38), 24,1. 303 pp.

Kardell, L. 1962. Svåra knäckesjukeangrepp. Skogen 49, 340—341.

Karu, A. 1937. Männi-pigirooste. Caeoma pinitorquum A. B. (Melampsora pinitorqua Rostr.). Eesti Mets 17, 393—398.

Klebahn, H. 1904. Die wirtswechselnden Rostpilze. 447 pp. Berlin.

—»— 1914. Kulturversuche mit Rostpilzen. XV. Bericht (1912 und 1913). Z. Pfl.-krankh. 24, 1—32.

Klingström, A. 1963. Melampsora pinitorqua (Braun) Rostr. — pine twisting rust. Some experiments in resistance-biology. Stud. For. Suec. 6. 23 pp.

Krutov, V. I. 1971. (The incidence of Melampsora pinitorqua (A. Br.) Rostr. on young pine trees in the Kola peninsula and in the Karelian ASSR). Mikol. i Fitopatol. 5, 366—373.

Kujala, V. 1950. Über die Kleinpilze der Koniferen in Finnland. Comm. Inst. For. Fenn. 38,4. 97 pp.

Liro, J. I. 1906. Kulturversuche mit finnischen Rostpilzen I. Acta Soc. Fauna Flora Fenn. 29,6. 25 pp.

—»— 1908. Uredineae Fennicae. 642 pp. Helsinki.

Longo, N., F. Moriondo, and B. Naldini. 1970. Biologia ed epidemiologia di Melampsora pinitorqua Rostr. Ann. Accad. Ital. Sci. For. 19, 81—175.

Moriondo, F. 1961. Ripetizione sperimentale del ciclo biologico di Melampsora pinitorqua Rostr. Ital. For. Mont. 16, 73—77.

—»— 1962. Epidemie di ruggine curvatrice del pino in Toscana. Ital. For. Mont. 17, 218—227.

Neuhaus, W. 1969. Zur Teleutosporenkeimung von Puccinia sorghi Schw. Zbl. Bakteriol. Parasitenk. Infektionskranh. u. Hyg. II, 128, 266—271.

Nighswander, J. E. and R. F. Patton. 1965. The epidemiology of the Jack pine — oak gall rust (Cronartium quercuum) in Wisconsin. Can. J. Bot. 43, 1561—1581.

Pady, S. M. and C. L. Kramer. 1971. Basidiospore discharge in Gymnosporangium. Phytopathology 61, 951—953.

Powers, H. R. and R. W. Roncadori. 1966. Teliospore germination and sporidial production by Cronartium fusiforme. Pl. Dis. Rep. 50, 432—434.

Regler, W. 1957. Der Kieferndrehrost (Melampsora pinitorqua), eine wirtschaftlich wichtige Infektionskrankheit der Gattung Pinus. Wiss. Abh. Deutsch. Akad. Landw.wiss. 27 (Beitr. Pappelforsch.), 205—234.

Rennerfelt, E. 1954. Biologische Untersuchungen über den Kieferndreher Melampsora pinitorqua (Braun) Rostr. Proc. Congr. Int. Union For. Res. Organ., Rome, (1953), 705—711.

Rostrup, E. 1884. Nogle nye iakttagelser angaaende heteroeciske Uredineer. Overs. K. Danske Vidensk. Selsk. Forh. Medl. Arbejder 1884, 1—20.

Schafranskaja, W. N. 1940. Der Kieferndreher in Pflanzgärten. Ergebnisse wiss. Untersuch. Bjeloruss. wiss. Forsch. Inst. f. Forstwirtsch. (Sosnowy wertun w pitomnikach »Resultaty nautschno — issledowatelskich rabot Belorusskogo nautsch. — issledow. instituta lesnogo chosjaistwa.») 1940, Gomel, Verl. Bel. NJJICH. (Ref. Regler 1957).

Siggers, P. V. 1947. Temperature requirements for germination of spores of Cronartium fusiforme. Phytopathology 17, 855—864.

Snow, G. A. 1968 a. Basidiospore production by Cronartium fusiforme as affected by suboptimal temperatures and preconditioning of teliospores. Phytopathology 58, 1541—1546.

—»— 1968 b. Time required for infection of pine by Cronartium fusiforme and effect of field and laboratory exposure after inoculation. Phytopathology 58, 1547—1550.

Sylvén, N. 1918. 1917 års knäckesjuka i norra Västergotland. Medd. Stat. Skogsf.-anst. 15, 192—204.

Tsanova, P. 1967. (Certain aspects of the biology of Melampsora pinitorqua Rost.). Gorsko Stop. Nauka 4, 67—79.

Viirok, E. 1931. Märkmeid monedest metsakultuuride vaenlastest. Eesti Mets 11, 228—229.

Wilson, M. and D. M. Henderson. 1966. British rust fungi. 348 pp. Cambridge Univ. Press, Gambridge.

TULOSTEN LUOTETTAVUUS JA KARTTATULOSTUS VALTAKUNNAN METSIEN V INVENTOINNISSA

SAKARI SALMINEN

SUMMARY:

RELIABILITY OF THE RESULTS FROM THE FIFTH NATIONAL FOREST INVENTORY AND A PRESENTATION OF AN OUTPUT-MAPPING TECHNIQUE

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0068-4

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

ALKUSANAT

Valtakunnan metsien V inventoinnin kenttätyöt päättyivät kesällä 1970. Inventoinnin tuloksia on julkistettu osa-alueittain inventoinnin edistymisen myötä. Samoin ovat valmistuneet koko valtakunnan metsävaroja esittävät julkaisut. Mainittuihin selvityksiin liittyvinä ovat nyt käsittelyvuorossa inventoinnin tulosten luotettavuus sekä tulosten kuvaaminen karttamuodossa.

Julkaisussa on keskitytty muutamien päätunnusten tarkasteluun. Tehtäväkentän rajaus on tehty tiiviissä yhteistyössä professori Kullervo Kuuselan kanssa. Käsikirjoituksen ovat lukeneet professorit Kullervo Kuusela ja Hannu Väliaho, tohtori Simo Poso ja metsänhoitaja Jouko Laasasenaho. Heidän esittämänsä huomautukset ovat oleellisesti vaikuttaneet tutkimuksen lopulliseen muotoutumiseen.

Maan kolmen pohjoisimman kunnan osalta on karttojen valmistuksen vaatimista ATK-töistä samoinkuin karttojen kuvioinnista huolehtinut metsäteknikko Matti Kujala. Englanninkielisen lyhennelmän on kääntänyt metsänhoitaja Karl-Johan Ahlsved. Käännöstyöhön liittyvissä kysymyksissä olen saanut apua myös maisteri Yrjö Sihvolta. Tietokoneohjelmiston luonnissa on käytetty apuna tutkimuslaitoksen ulkopuolista työvoimaa. Muilta osin on töiden kulusta vastannut metsänarvioimisen tutkimusosaston henkilökunta.

Työtä varten olen saanut apurahan Suomen Luonnonvarain Tutkimussäätiöltä. Apuraha mahdollisti tarvittavan tietokoneohjelmiston rakentamisen luonteeltaan yleiseksi. Sekä ohjelmistoa luotaessa että tuotantoajoja suoritettaessa saatiin valaistusta siihen, mihin näkökohtiin on kiinnitettävä huomiota parametriohjauksella toimivia tietokoneohjelmia suunniteltaessa. Saatua kokemusta on käytetty hyväksi, kun on kehitetty par'aikaa käynnissä olevaan valtakunnan metsien VI inventointiin liittyvää ATK-systeemiä.

Helsingissä toukokuussa 1973.

Sakari Salminen

SISÄLTÖ—CONTENS

Sivu—Page

1. Työn taustasta ja tavoitteista 5
   11. Tietoja V inventoinnista 5
   12. Työn tavoitteista 7
2. Luotu tietokoneohjelmisto 9
3. Tulosten luotettavuus 13
   31. Käsitteitä ja merkintöjä 13
   32. Keskivirheiden laskentamenetelmä 15
      321. Menetelmäselostuksen puitteet 15
      322. Keskivirheiden laskenta perusalueella 15
         3221. Keskiarvotunnukset 15
         3222. Summatunnukset 20
      323. Keskivirheiden laskenta yhdistelyalueella 21
   33. Lasketut keskivirheet 22
   34. Keskivirheiden käyttöön liittyviä näkökohtia 31
4. Kartat 33
   41. Karttojen valmistusmenetelmä 33
   42. Selostus tehdyistä kartoista 38
      421. Karttoja koskevia yleistietoja 38
      422. Pinta-alaosuuskartat 39
         4221. Metsämaasadanneskartta 39
         4222. Kehitysluokkakartat 40
      423. Puustokartat 42
         4231. Keskikuutiokartat 42
         4232. Puulajien osuudet metsämaan kuutiomäärästä 43
         4233. Keskipohjapinta-ala ja keskiläpimitta 45
   43. Karttatulostukseen liittyviä näkökohtia 46
5. Tiivistelmä 48

Kirjallisuus — References 49

Karttaluettelo 51

List of maps 51

Summary in English 62

1. TYÖN TAUSTASTA JA TAVOITTEISTA

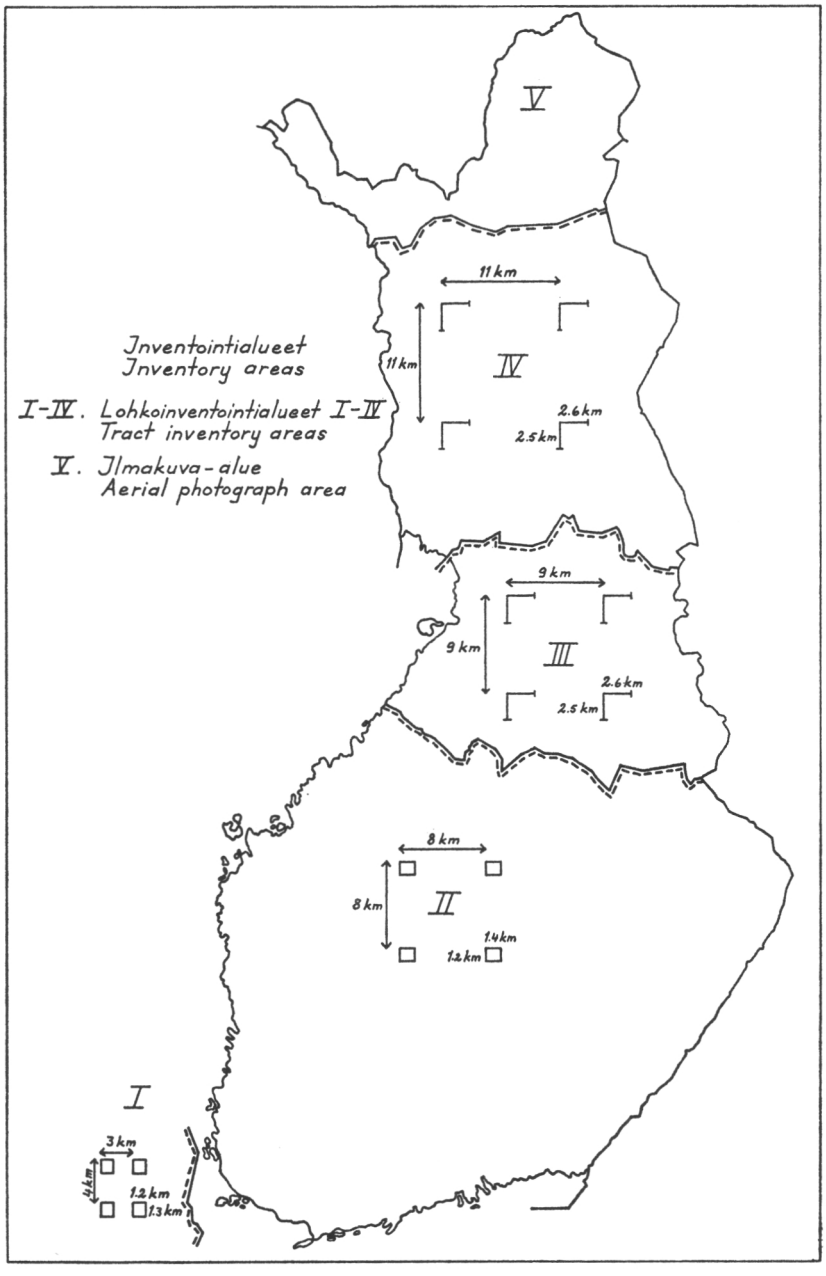
11. Tietoja V inventoinnista

Valtakunnan metsien V inventointi suoritettiin vuosina 1963—1970. Inventoinnin tuloksia ovat piirimetsälautakuntia, maan etelä- ja pohjoisosia ja koko maata koskevina julkaisseet K u u s e l a (1966a, 1967, 1970, 1972) sekä K u u s e l a & S a l o v a a r a (1968, 1969, 1971). Paljon muitakin tietoja on koottu kerätystä aineistosta (vrt. K u u s e l a & S a l m i n e n 1969, s. 69). Näissä tehtävissä laskenta-alueet on yleensä muodostettu kuntia perusyksikköinä käyttäen. Vain pieni osa laskentojen pohjalta tehdyistä selvityksistä on julkaistu. Esimerkkinä painoasun saaneista töistä voidaan mainita Pirkka-Hämeen metsien alueittainen esittely (Pirkka-Hämeen . . . 1968).

Maan pohjoisinta osaa lukuunottamatta inventoinnin aineistot on koottu systemaattista otantaa käyttäen. Tämän inventoinnin tasavälein maastoon sijoitettuja otosyksiköitä kutsutaan l o h k o i k s i ja koko inventointia lohkoinventoinniksi. Kolmen pohjoisimman kunnan inventointimenetelmänä on ollut yhdistetty ilmakuva- ja maasto-otanta. Kuvassa 1 tämä alue on erotettu ilmakuva-alueeksi. Tässä julkaisussa käsitellään etupäässä lohkoinventointiin liittyviä kysymyksiä; ilmakuva-alueen inventoinnin osalta viitataan P o s o n & K u j a l a n (1971) menetelmäselostukseen.

Lohkoinventoinnin lohko-otosta ei läpi käyttöalueensa ole pidetty samana, vaan sekä lohkojen muotoa, kokoa että keskinäistä etäisyyttä on vaihdeltu osa-alueittain. Kuvaan 1 on merkitty nämä lohkoinventointialueina ja kullekin piirretty neljän lohkon lohkoryhmä havainnollistamaan kyseiseltä alueelta otettua lohko-otosta. Lohkojen koko ja keskinäinen etäisyys ovat kuvasta yksikäsitteisesti tulkittavissa, mutta muodon suhteen voi syntyä epätietoisuutta. Siksi sovitaan, että lohko on se murtoviiva, joka esittää lohkoa. Tämän määrittelyn mukaan lohko kuvassa 1 on joko suorakulmion piiri tai suorakulma, jonka sivut on katkaistu määrämittaan kulman kärjestä lukien.

Yksityiset lohkot inventoidaan yhdistettyä linja- ja koeala-arviointia käyttäen. Lohko on muodostanut mitattavan linjan, ja linjalta on otettu



Kuva 1. Inventointialueet ja lohkojen muoto, koko ja keskinäinen etäisyys eri lohkoinventointialueilla.

Fig. 1. Inventory areas and the shape, size and distance of the tracts in various tract inventory areas.

koealoja 100 metrin välein. Koealat on mitattu relaskooppikoealoina. Yksityiskohtainen selvitys lohkoinventoinnin suoritustavasta on inventoinnin menetelmäjulkaisussa (K u u s e l a & S a l m i n e n 1969).

Lohkot on lohkoinventointialueittain numeroitu kaksiulotteisen koordinaatiston pisteinä. Biologian eri aloille on annettu suositus havaintopaikkojen ilmoittamisesta karttojen y h t e n ä i s k o o r d i n a a t i s t o n koordinaatein (Suositus ruutujärjestelmän . . . 1970). Lohkojen numerointi on helposti muutettavissa tämän suosituksen mukaiseksi.

Inventointiaineistot eivät sisällä pelkkien vesilohkojen tietoja. Tiedot on rekisteröity vain niiltä lohkoilta, jotka edes osittain sisältävät maalinjaa. Tällaisten lohkojen lukumäärät inventointialueittain ovat:

Lohkoinventointialue *Tract inventory area*	Lohkoja, kpl *Tracts, s*
I	347
II	2968
III	637
IV	618

Ahvenanmaalla lohkosto on oleellisesti tiheämpi kuin muualla. Täällä inventoinnin kenttätyöt on hoidettu pääosaksi Ahvenanmaan maakuntahallituksen toimesta (K u u s e l a 1966a, s. 1), joten lohkolukumäärä on voitu valita maakunnan tarpeita vastaavaksi.

Valtakunnan metsien V inventoinnin alkuperäisaineiston muodostavat arkistoidut maastolomakkeet, mutta lähes täydellisinä ovat aineistot myös magneettinauhoilla. Poikkeuksena on Ahvenanmaa. Sieltä kerätty aineisto on tallennettuna ainoastaan maastolomakkeina.

Metsämaa-nimitystä ei julkaisussa ole käytetty sanan yleiskielen mukaisessa merkityksessä vaan tarkoittamaan yhtä inventoinnissa rekisteröitävää maaluokkaa. Inventoinnissa metsätalouden piiriin kuuluva maa 1. metsätalouden maa jaetaan neljään maaluokkaan: metsämaa, kitumaa, joutomaa ja muu metsätalouden maa. Metsämaa määritellään puun kasvuun käytettävänä tai käytettävissä olevana maana, jolla optimipuuston keskimääräinen vuotuinen kuorellinen kasvu 100 vuoden kiertoaikaa käytettäessä on vähintäin 1 m^3/ha. Tarkempi selvitys inventoinnissa eroteltavista maaluokista on annettu menetelmäjulkaisussa (K u u s e l a & S a l m i n e n 1969, s. 19).

12. Työn tavoitteista

Työlle on asetettu kaksi selvästi toisistaan poikkeavaa tavoitetta. Toisaalta pyritään luomaan kokonaiskuva inventoinnin luotettavuudesta ja toisaalta valmistamaan koko maasta metsällisten tunnusten systemaattista vaihtelua kuvaavat kartat.

Suoritettu runsas tulosten laskenta vaatii rinnalleen luotettavuustarkasteluja. Samoin niitä edellyttää jatkuvuus, koska — IV inventointia lukuunottamatta — aiemmista valtakunnan metsien inventoinneista on tehty inventoinnissa kerättyyn aineistoon perustuvat keskivirhelaskelmat (Ilvessalo 1927, 1942, 1956). Karttatulostuksella ei ole yhtä pitkiä perinteitä, mutta jo III inventoinnin tuloksia on esitetty karttajulkaisuna (Ilvessalo 1960). Tällä perusteella molemmat tavoitteet kuuluvat inventoinnin vakiotavoitteisiin.

Lohkoinventoinnin keskivirheiden laskenta edellyttää lohkoittaisia tuloksia ja näiden yhdistelyä lohkoryhmittäisiksi tuloksiksi. Laskennan pohjana olevien lohkoryhmien tulee kattaa laskenta-aluetta säännöllisenä peitteenä. Systemaattisena lohko-otoksena kootusta aineistosta tunnusten systemaattinen vaihtelu on paikallistettavissa lohkoittaisia tuloksia käyttäen. Näiden suurehkoa satunnaisvaihtelua voidaan pienentää siirtymällä lohkoryhmittäisiin tuloksiin. Näin sekä lohkoryhmittäisten tulosten laskennan suorittavan tietokoneohjelmiston luonti että valtaosin ohjelmistolla suoritettavat tulostusajot ovat yhteisiä työvaiheita esitettyihin tavoitteisiin pyrittäessä.

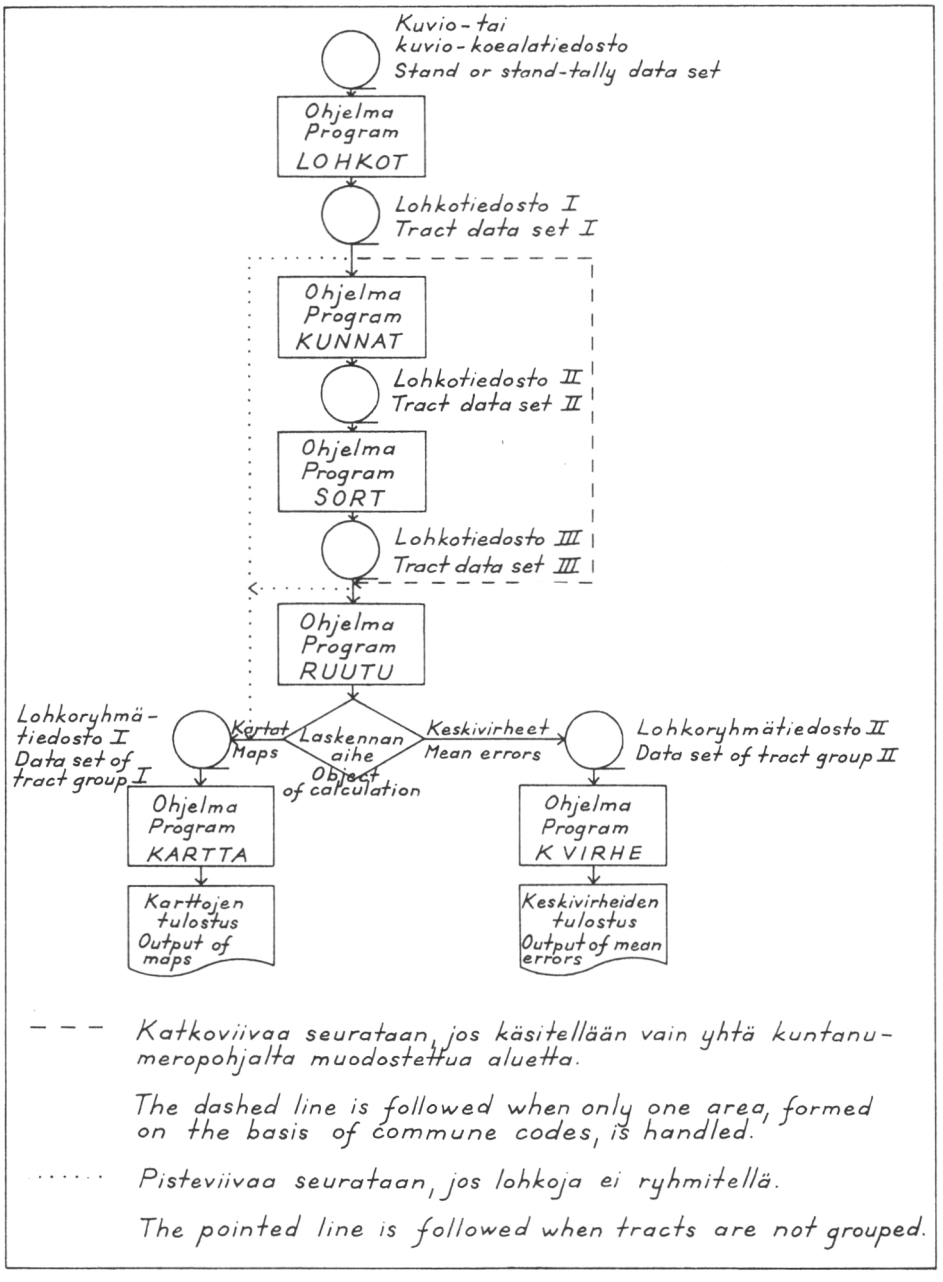
2. LUOTU TIETOKONEOHJELMISTO

Alueittaisten tulosten laskentaan käytettäviin inventoinnin ohjelmiin ei ole liitetty mahdollisuutta saada lohkoryhmittäisiä tuloksia. Niiden laskeminen edellytti oman tietokoneohjelmiston luomista. Ohjelmiston ajokaavio on esitetty kuvassa 2. Siinä näkyvät sekä laaditut ohjelmat että niiden käyttöön liittyvät tiedostot. Ohjelmat on kirjoitettu koneelle IBM 1410. Tätä konemerkkiä ei enää ole käytettävissä, mutta ohjelmistoa voidaan ajaa ns. emulaattoriajona Puolustuslaitoksen Tietokonekeskuksen koneistolla S/360 G 50. Ohjelmat on valtaosin kirjoitettu IBM 1410 Autocoder-ohjelmointikielellä, mutta myös Fortran-kieltä on käytetty. Kaikki kaavioon merkityt tiedostot ovat magneettinauhatiedostoja.

Ohjelmat on toimintaperiaatteiltaan pyritty rakentamaan yleisiksi. Tarkat työskentelyohjeet kussakin laskentatilanteessa annetaan ohjelmille parametrikorteilla. Tämä ohjaava parametrikortisto tulostetaan sekä rivikirjoittimella että otetaan talteen tulostustiedostona olevan magneettinauhan alkuun. Näin helpotetaan ajovaiheessa syntyneiden virheiden havaitsemista ja paikallistamista. Samaa tarkoitusta palvelee vertailusummien ja tietuelukumäärien keräily ja tulostus. Tietueet nimetään julkaisussa tiedostonimen mukaan. Siten esim. lohkotiedostossa on lohkotietueita.

Lohkoittaisten tulosten laskemiseen on kehitetty ohjelma LOHKOT. Tämän syöttötiedostona on joko V inventoinnin kuvio- tai kuviokoealatiedosto. Näiden tietuemallit ovat muuten samat kuin menetelmäjulkaisussa (Kuusela & Salminen 1969, s. 52), mutta koealatietueella on kutakin puuta kohti ilmoitettu puulajin, puuluokan ja rinnankorkeusläpimitan lisäksi puun edustama kuutiomäärä. Ajotilanteessa aineistosta päästetään laskentaan vain halutut tietueet. Karkein seulonta tapahtuu lohkonumeron perusteella. Muilta osin kerättävän tiedon karsinta ja ryhmittely suoritetaan rajoitus- ja ryhmäkorttien sisältämän ohjaustiedon mukaisesti. Pinta-alatietoja ajettaessa käsitellään vain kuviotietueita. Puustotietoja koottaessa on käytettävissä kolme ohjaustasoa:

— kuviotietueen välityksellä pinta-alaluokkiin kohdistuva ohjaus,
— koealatietueen yleistietoihin kohdistuva ohjaus,
— yksityisen puun tietoihin kohdistuva ohjaus.



Kuva 2. Lohkoryhmittäistä tulostusta varten luodun tietokoneohjelmiston ajokaavio.
Fig. 2. Running scheme for computer programs worked out for output by tract groups.

LOHKOT-ohjelman tulostustiedosto, lohkotiedosto I, sisältää ajossa kerätyt summaustulokset. Lohkotietueen identifioimistiedon muodostavat lohkonumero ja kuntanumero. Näillä on tietueessa omat vakiopaikkansa. Varsinaisten tulostuskenttien lukumäärä ja pituus vaihtelevat kerättävän tiedon vaatimusten mukaisesti. Lohkotietue voi sisältää:

a) koko lohkon summatiedot,
b) niiden peräkkäisten tietueiden summatiedot, joilla lohko- ja kuntanumero on sama,
c) lohkonumerosta välittämättä niiden tietueiden summatiedot, joilla kuntanumero on sama.

Kohdassa a) kuntanumerolla ja kohdassa c) lohkonumerolla ei ole mitään merkitystä identifioimiskenttänä.

LOHKOT-ohjelma on tyypillinen tiedoston tiivistämisohjelma. Sen tulostustiedoston tietueiden lukumäärä supistuu keskimäärin kahteen prosenttiin syöttötiedoston tietueiden lukumäärästä. Yleinen LOHKOT-ohjelma saatiin teknisesti toimimaan moitteettomasti. Käytössä havaittiin kuitenkin, että sillä tehtäviin ajoihin kului runsaasti tietokoneaikaa. Tästä syystä ohjelmaan on liitetty muutamia yleisyyttä vähentäviä, mutta ajoja nopeuttavia moduleita.

Jos lohkotiedostoa käytetään tehtävissä, joissa samalla ajokierroksella käsitellään useampia, kuntia perusyksikköinä käyttäen muodostettavia alueita, on kunkin lohkotietueen kuntanumero korvattava aluenumerolla. Tämä suoritetaan ohjelmalla KUNNAT. Ohjelman syöttötiedostoina ovat lohkotiedosto I sekä k u n t a t i e d o s t o, joka sisältää luettelot kuhunkin alueeseen kuuluvista kunnista. Lohkotiedosto II — KUNNAT-ohjelman tulostustiedosto — lajitellaan koneenvalmistajan valmiilla SORT-ohjelmalla alue- ja lohkonumeroiden mukaiseen nousevaan järjestykseen tiedostoksi lohkotiedosto III.

Lohkotietueiden ryhmittely l o h k o r y h m ä t i e t u e i k s i tehdään ohjelmalla RUUTU. Ryhmittelyssä nojaudutaan tietoon, että lohkonumerot voidaan tulkita kaksiulotteisen koordinaatiston pisteiksi. Ohjelmalle ilmoitetaan ryhmittelyn peruspiste, käsiteltävä alue sekä alueen peittävä suorakulmio. Peruspisteestä lähtien muodostetaan lohkonumeroista suorakulmion sisään säännöllinen l o h k o r y h m ä t u n n u s p i s t e i s t ö, jonka tiheys määräytyy ohjauskorteilta. Kunkin lohkoryhmätunnuspisteen ympärille muodostetaan lohkoryhmä, jonka muoto ja koko valitaan laskentatilanteen vaatimusten mukaisesti. Jos ryhmätunnuspisteen yksilöimä lohko osittainkin kuuluu käsiteltävään alueeseen, kerätään lohkoryhmää koskevat tiedot niiltä lohkoilta tai lohkonosilta, jotka kuuluvat alueeseen ja joiden lohkonumeroa vastaava piste kuuluu lohkoryhmään. Lohkoryhmää koskevat tie-

dot tulostetaan lohkoryhmätietueena, jonka lohkonumerona on ryhmätunnuspiste. Jos ryhmätunnuspiste ei kuulu alueeseen, mutta lohkoryhmään kuuluvia lohkoja siihen edes osittain kuuluu, tulostetaan alueeseen kuuluvista lohkoista koostettu lohkoryhmätietue ainoastaan, jos syntyvää tiedostoa jatkolaskennassa käytetään keskivirhelaskennan syöttötiedostona. Kuviin 3, 4 ja 7 on piirretty esimerkkejä kuvatusta lohkojen ryhmittelymenetelmästä.

RUUTU-ohjelman syöttötiedosto on peräkkäistiedosto, jossa tietueet ovat lohkonumerojärjestyksessä. Lohkoryhmiä muodostettaessa tietueita ei käsitellä peräkkäin, vaan samaan lohkoryhmään liitetään tavallisesti tietoja useammalta y-koordinaatin yksilöimältä lohkoriviltä. Kaikkien näiden rivien lohkokohtaisten tietojen on oltava samanaikaisesti keskusmuistissa. Tämä nopeuttaa ajoja, mutta asettaa käytettävissä olevan muistitilan määräämän ylärajan muodostettavien lohkoryhmien koolle. Toisaalta systeemi ei edellytä kaikkien lohkotietueen tietojen siirtämistä lohkoryhmätietueelle. Rajoittumalla tiedon siirrossa vain kussakin ajotilanteessa relevantteihin tietokenttiin saadaan määrättyyn muistitilaan sopimaan useamman lohkon tiedot. Jos lohkoryhmätiedostoa käytetään karttatulostuksen syöttöaineistona, sisältää lohkoryhmätietue pelkkiä summatietoja ryhmään kuuluvilta lohkoilta. Keskivirhelaskennan syöttöaineistossa on sensijaan kyse symmetrisistä erotuksista lohkoryhmän sisällä. Tästä syystä ajokaavioon on merkitty erikseen lohkoryhmätiedostot I ja II. Keskivirheet lasketaan ohjelmalla KVIRHE ja kartat tulostetaan ohjelmalla KARTTA. Näillä ohjelmilla on yhteisenä piirteenä RUUTU-ohjelman luomien kenttien summausmahdollisuus. Esimerkiksi puulajikohtaiset kentät summaamalla päästään laskemaan kaikkia puulajeja koskevia tuloksia. Näin vähentyy tarvittava tietokoneajojen määrä. Tarkempi kuvaus ohjelmista KVIRHE ja KARTTA annetaan luotettavuutta ja karttatulostusta käsiteltäessä.

3. TULOSTEN LUOTETTAVUUS

31. Käsitteitä ja merkintöjä

Inventoinnin tulokset ovat valtaosin erilaisten tunnusten määriä tai suhteita kuvaavia arvioita l. estimaatteja. Esimerkkeinä tunnuksista mainittakoon metsämaan osuus kokonaismaa-alasta ja keskikuutio. Sovitun laskenta-alueen puitteissa kullakin tunnuksella on todellinen arvonsa, joka yleensä on tuntematon.

Jos pidettäisiin lohkojen muoto, koko ja keskinäinen etäisyys samoina, mutta vaihdeltaisiin koko lohkoston sijaintia satunnaisesti, saataisiin eri sijoittelujen tuloksena yksityiselle määrä- tai suhdetunnukselle yleensä erilaisia arvioita. Kuvitellaan, että olisi mahdollista käydä läpi kaikki vaihtoehtoiset lohkostosijoittelut ja laskea kaikille otoksille kyseinen arvio. Näiden keskiarvo osoittaisi, mikä arvo tunnukselle saataisiin, jos inventointiperusteet muuten pidettäisiin samoina, mutta otoksen sijasta aineisto koottaisiin kokonaisaineistona. Mainittua arvoa kutsutaan odotusarvoksi. Lohkostolla on ääretön määrä erilaisia vaihtoehtoja alueelle sijoittumiseen. Näitä kaikkia ei voida inventoida ja niinpä odotusarvokin on yleensä tuntematon.

Jos olisi käytettävissä edellä kuvatulla tavalla lasketut määrä- tai suhdeestimaatit, antaisi näiden hajonta tarkan tiedon estimaatin luotettavuudesta. Koska näitä kaikkia ei kuitenkaan pystytä laskemaan, on tyydyttävä otoksesta saatavaan hajonnan arvioon. Se kuvaa tunnuksen satunnaisvaihtelua ja sitä kutsutaan keskivirheeksi. Merkitään yleisesti sekä tunnusta että sen odotusarvoa kuvaavaa estimaattia kirjaimella e ja sovitaan seuraavat keskivirhenimitykset ja merkinnät:

(1) s_e = tunnuksen e absoluuttinen keskivirhe. Jos puhutaan vain keskivirheestä, tarkoitetaan aina absoluuttista keskivirhettä.

r_e = tunnuksen e suhteellinen keskivirhe.

Esitettyjä keskivirheitä sitoo toisiinsa yhtälö

$$r_e = \frac{100\, s_e}{e}.$$

Keskivirheiden avulla saadaan käsitys inventoinnin tulosten luotettavuudesta. Siitä huolimatta, että tulokset olisivat luotettavia, niiden ei tarvitse olla tarkkoja. Jos esimerkiksi kuutioimistaulukot antavat yleisesti puille todellista pienempiä kuutiomääriä, saadaan inventoinnissa järjestelmällisesti liian pieniä kuutiotuloksia; kyseessä on s y s t e m a a t t i n e n v i r h e. Systemaattisia virheitä voi syntyä sekä inventoinnin suunnittelu-, maastotyö- että laskentavaiheessa. Edellä on puhuttu tunnuksen todellisesta arvosta ja odotusarvosta. Systemaattisen virheen suuruuden määrää näiden erotus. Koska mainitut arvot ovat yleensä tuntemattomia, on jo vaikeata todeta systemaattisten virheiden olemassaolo ja vielä vaikeampaa on paikallistaa niiden aiheuttajat.

Tulosten luotettavuuden kuvaamiseen käytetään keskivirheiden ohella l u o t t a m u s v ä l i k s i kutsuttua intervalliestimaattia. Jos merkitään tarvittavaa parametria kirjaimella a ja muuten sovelletaan kohdan (1) merkintöjä, luottamusvälin päätepisteet saadaan lausekkeesta

$$e \pm a s_e. \tag{2}$$

Todennäköisyys, jolla estimaatin e odotusarvo sijaitsee tarkasteltavalla luottamusvälillä, riippuu parametrista a. Jos a:lle annetaan arvo 2, on kyseinen todennäköisyys noin 95 %.

Nimitetään p e r u s a l u e e k s i aluetta, jolla lohkojen muoto, koko ja keskinäinen etäisyys pysyvät samoina. Inventoinnin perusalueita ovat esimerkiksi inventointialueet ja piirimetsälautakunnat (kuvat 1 ja 5). Perusalueita yhdistelemällä on luotavissa y h d i s t e l y a l u e i t a, mutta yhdistelyalueiden ositteiden ei välttämättä tarvitse olla perusalueita. Jos jonkin tunnuksen keskivirheet tunnetaan ositteittain, on niistä laskettavissa vastaava keskivirhe yhdistelyalueelle.

Jaetaan aluekohtaiset määriä tai summia kuvaavat tunnukset k e s k i a r v o- ja s u m m a t u n n u k s i i n.

Tarkasteltavat keskiarvotunnukset symboleineen ovat:

(3)
m = metsämaan osuus kokonaismaa-alasta. Prosenteissa lausuttuna m on metsämaasadannes.
V = keskikuutio metsämaalla.
G = keskipohjapinta-ala metsämaalla.
D = pohjapinta-alalla punnittu keskiläpimitta metsämaalla.

Selostuksessa käsiteltävät summatunnukset symboleineen ovat:

(4)
M = metsämaan ala.
K = kokonaiskuutio metsämaalla.

Perus- ja yhdistelyalue sekä keskiarvo- ja summatunnus eivät liene yleisen käytännön mukaisia nimityksiä. Tässä yhteydessä kyseiset jaot on määritelty, jotta vältyttäisiin asioiden alituiselta toistolta.

32. Keskivirheiden laskentamenetelmä

321. Menetelmäselostuksen puitteet

Inventoinnin keskivirheiden laskentamenetelmän matemaattiset perusteet ja sovellutusmalli ovat peräisin Matérnilta (1960). Lisävalaistusta yksityiskohtiin on saatu eräistä muista Matérnin (1947, 1963) selvityksistä, Nyyssösen, Kilkin & Mikkolan (1967) julkaisusta sekä Braunin (1969) kuvaamasta keskivirheiden määrittelystä Itävallan metsien inventoinnissa. Käytetyn laskentamenetelmän matemaattiseen johtoon ei tässä yhteydessä puututa; tyydytään ainoastaan selostamaan menetelmän sovellutus tarkasteltavassa inventoinnissa. Ilmakuva-alueen keskivirheiden laskennan osalta viitataan Poson & Kujalan (1971, s. 23) selostukseen, jossa on esitetty keskivirheiden laskenta ilmakuva-alueella.

Menetelmää selostettaessa käsitellään vain metsämaata koskevia tunnuksia. Tämä rajoitus on tehty pelkästään esityksen yksinkertaistamiseksi; kuvattava menetelmä pätee sellaisenaan mille pinta-alaluokalle tahansa.

322. Keskivirheiden laskenta perusalueella

3221. Keskiarvotunnukset

Keskiarvotunnusten keskivirheiden määrittelyssä ovat perussuureita lohkoittaiset summat. Siksi on paikallaan aluksi antaa kaavat keskiarvotunnusten estimaattien laskemiseksi näitä summia käyttäen. Valitaan seuraavat symbolit:

(5)

y_i = maalinjametrien summa lohkolla i.
x_i = metsämaalinjametrien summa lohkolla i.
n_i = metsämaalta luettujen puiden lukumäärä lohkolla i.
k_i = metsämaalle sattuneiden koealojen kokojen summa lohkolla i. Relaskooppikoealan koko on välillä 0.1—1.0 vaihteleva suhdeluku, joka ilmoittaa, suuriko osa koealasta mahtuu kuviolle, jolla koealan keskipiste sijaitsee.
d_{ij} = lohkolta i mitatun puun j rinnankorkeusläpimitta.
U_{ij} = lohkolta i mitatun puun j yksikkökuutio. Yksikkökuutio ilmoittaa, mikä on puun edustama kuutiomäärä, jos puun annetaan edustaa pohjapinta-alaa 1 m².

(5) f = relaskooppikerroin. Relaskooppikoealalta luetun puun edustama pohjapinta-ala on f m². f määräytyy relaskoopin varren ja aukon suhteesta.

Merkintöjä (3) ja (5) käyttäen saadaan metsämaan osuuden, metsämaan keskikuution, keskipohjapinta-alan ja keskiläpimitan kaavat

$$m = \frac{\sum_i x_i}{\sum_i y_i}, \tag{6}$$

$$V = \frac{f \sum_i \sum_j U_{ij}}{\sum_i k_i}, \tag{7}$$

$$G = \frac{f \sum_i n_i}{\sum_i k_i}, \tag{8}$$

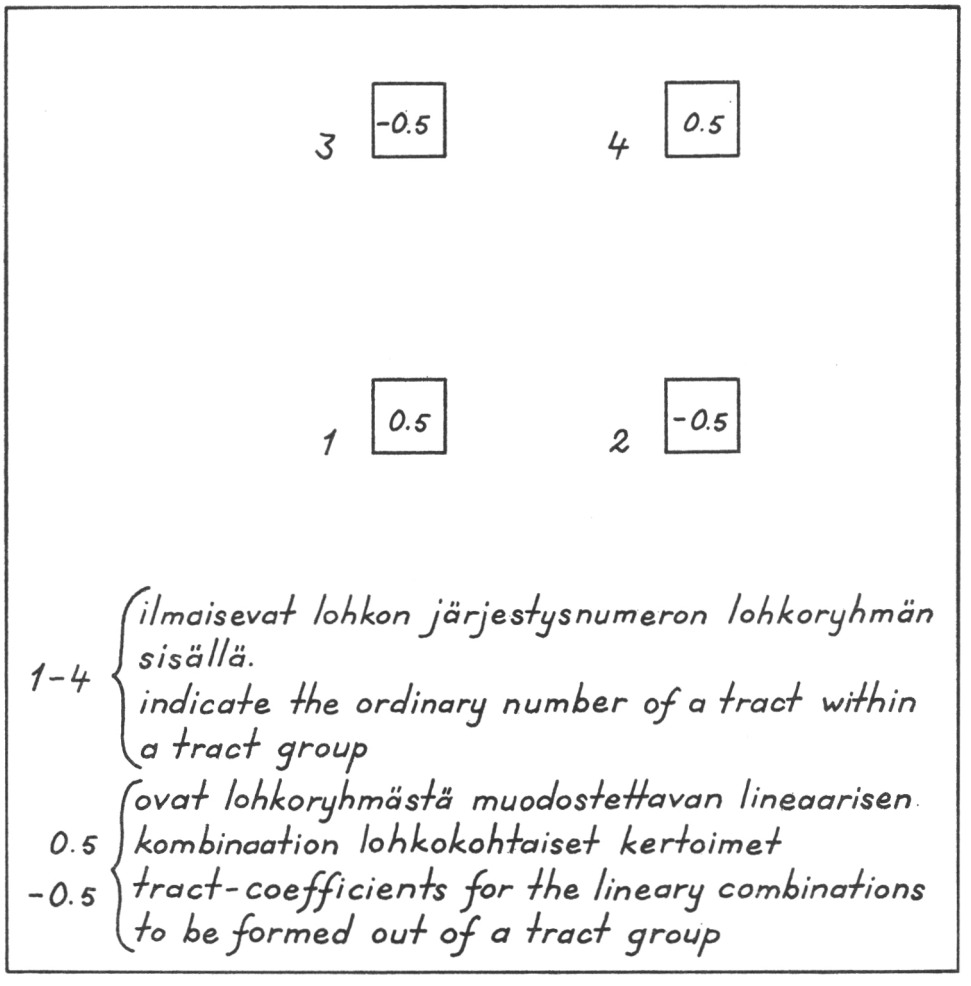
$$D = \frac{\sum_i \sum_j d_{ij}}{\sum_i n_i}. \tag{9}$$

Kaavoissa (6)—(9) lohkoindeksin i annetaan kulkea yli lohkojen, jotka kokonaan tai osaksi kuuluvat perusalueeseen. Vain osaksi perusalueeseen kuuluvilla lohkoilla lohkoittaiset summat sisältävät tietoja ainoastaan perusalueeseen kuuluvilta lohkon osilta. Edellisen mukaisesti indeksi j juoksutetaan yli puiden, jotka on luettu metsämaalta ja jotka samanaikaisesti kuuluvat perusalueeseen.

Kaavoja tarkasteltaessa on oleellista muistaa, että on kyseessä relaskooppiarviointi. Kaavojen johdon osalta viitataan Kuuselan (1966 b) selvitykseen. Inventoinnissa käytettyä koealojen koon määritystekniikkaa on selostettu myös menetelmäjulkaisussa (Kuusela & Salminen 1969, s. 38). Relaskooppikerroin f on inventoinnissa ollut 2.

Oletetaan hetkeksi, että keskiarvoestimaatti on laskettu erikseen kullekin perusalueen lohkolle. Jos tarkasteltava tunnus vaihtelee systemaattisesti alueen eri osissa, on ilmeistä, että vastaava vaihtelu heijastuu lohkokohtaisiin estimaatteihin. Tämä selittää lohkoryhmien sisäisen symmetristen erotusten käytön pyrittäessä eliminoimaan systemaattisen vaihtelun osuus lohkoittaisten estimaattien välisestä kokonaisvaihtelusta.

Inventoinnin varianssilaskelmissa on lohkot ryhmitetty kuvan 3 mukaisesti. Valitaan jatkossa tarkastelun kohteeksi kaavan (6) ilmoittaman met-



Kuvä 3. Inventoinnin keskivirheiden laskennassa käytetty lohkoryhmä.
Fig. 3. Tract group used for calculation of mean errors in the inventory.

sämaan osuuden keskivirheen määrääminen. Suhde-estimaatin varianssin laskentaperiaatteiden mukaisesti (vrt. Cochran 1963, s. 163) määrätään lohkoryhmässä lohkoittain suureet

$$z_h = x_h - m y_h \qquad (h = 1,\ 2,\ 3,\ 4). \tag{10}$$

Muodostetaan z_h-arvojen lineaarinen kombinaatio kertomalla ne kuvan 3 kertoimilla. Kun saatu lineaarinen yhdistely neliöidään, päädytään neliömuotoon

$$T = \tfrac{1}{4}(z_1 - z_2 - z_3 + z_4)^2. \tag{11}$$

Todetaan, että neliömuodon T kantana olevan lineaarisen yhdistelyn kertoimien summa = 0 ja kertoimien neliöiden summa = 1. Nämä ovat tyypilliset kertoimien ominaisuudet neliömuodoille, joita käyttäen pyritään eliminoimaan systemaattista komponenttia otoksen kokonaisvaihtelusta (Matérn 1947, s. 11, Nyyssönen, Kilkki & Mikkola 1967, s. 43).

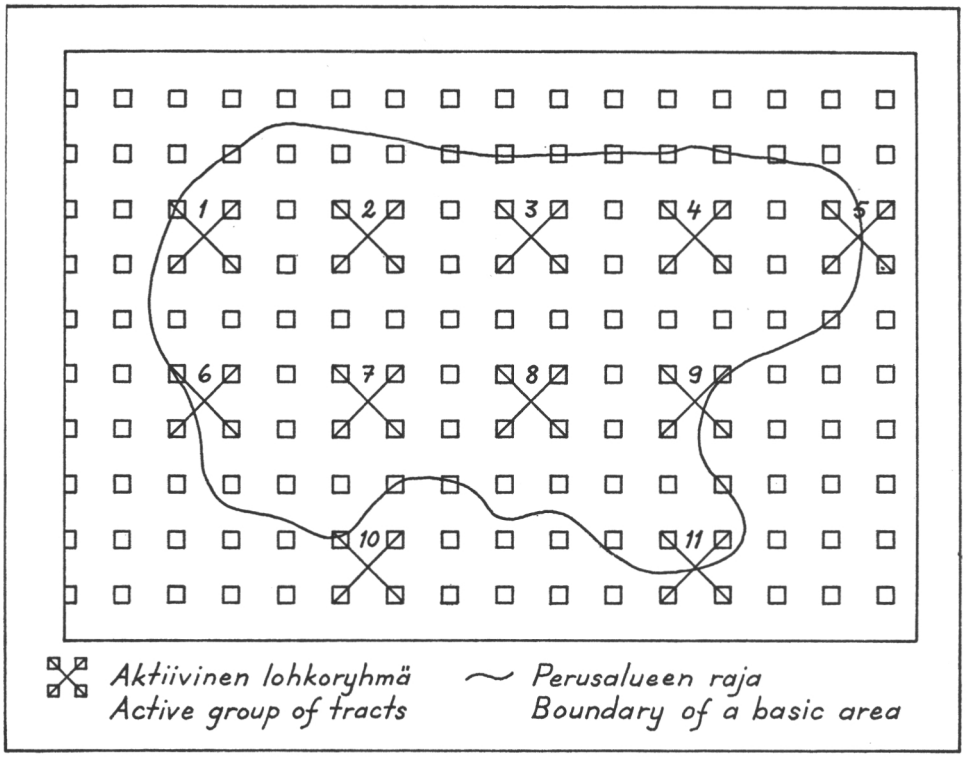
Kuvitellaan perusalue rajoitetuksi tasolle ja taso peitetyksi säännöllisesti sijoitetuilla lohkoryhmillä. Eräs esimerkkitilanne on esitetty kuvassa 4. Luetaan kaavojen (6)—(9) selityksen mukaisesti lohkon i maalinjametrien muodostamaan y_i-summaan vain niiden maalle sattuvien lohkonosien pituus, jotka kuuluvat perusalueeseen. Nimitetään lohkoryhmää aktiiviseksi lohkoryhmäksi, jos siihen kuuluu ainakin yksi lohko, jonka y_i-arvo poikkeaa nollasta. Yksilöidään aktiiviset lohkoryhmät indeksillä l ja lasketaan kaavan (11) mukaiset T_l-arvot. Metsämaan osuuden keskivirhe määrätään tämän jälkeen kaavasta

$$s_m = \frac{\sqrt{q \sum_l T_l}}{\sum_i y_i}. \tag{12}$$

Kaavassa indeksi l kulkee läpi aktiiviset lohkoryhmät ja Σy_i esittää maalinjametrien summaa koko perusalueella. Ryhmäkerroin q ilmoittaa lohkoryhmän edustamien lohkojen lukumäärän. Kuvan 4 esittämässä peitemallissa $q = 9$. Yksityinen T_l-arvo kuvaa osuutta, joka yhdellä lohkolla on estimoitavaan satunnaispoikkeamien neliösummaan lohkoryhmässä l. Kun T_l-arvojen summa kerrotaan ryhmäkertoimella q, saadaan estimaatti poikkeamien neliösummalle perusalueessa. Tämän jako maalinjametrien summalla palautuu suhde-estimaatin laskentakaavan välittömäksi soveltamiseksi (vrt. Cochran 1963, s. 163).

Kuvittelemalla lohkoryhmittely ulotetuksi yli koko tason voidaan esitetty laskentamenetelmä tulkita äärettömän alueen keskivirheen laskentamenetelmäksi. Toisaalta tasoon rajattu perusalue on äärellinen. Keskivirheen laskennassa perusalueen rajat synnyttävät lohkoryhmiä, jotka vain osittain kuuluvat perusalueeseen. Näillä kaavan (11) tasoitusmekanismi ei toimi samoin kuin perusalueen sisäisillä lohkoryhmillä. Niiden keskivirhettä kasvattava vaikutus on yleensä suurempi kuin niiden vaikutus keskiarvoestimaattiin edellyttäisi. Kuvatun rajavaikutuksen tehtävänä on varmistaa, että tämä äärettömälle alueelle luotu laskentamenettely ei äärellisille alueille sovellettunakaan johda systemaattiseen keskivirheen aliarviointiin.

Kaavaa (12) sovellettaessa tulisi aktiivisten lohkoryhmien lukumäärän olla vähintään 30, mutta mieluummin 100 tai enemmän (Matérn 1963). Tämä vaatimus paljolti määrää, miten lohkoryhmät on sijoitettava. Inven-



Kuva 4. Aktiivisten lohkoryhmien muodostaminen perusalueen keskivirheitä laskettaessa.
Fig. 4. Formation of active tract groups for calculation of the mean error for a basic area.

toinnissa on piirimetsälautakunnittain käytetty sijoittelua, jossa viereiset lohkoryhmät ovat puoliksi peittäneet toisensa. Tällöin kertoimella q on arvo 2. Inventointialueittain on jo voitu käyttää peitemalleja, joilla q on saanut arvot 4 tai 9. Arvolla $q = 4$ jokainen lohko kuuluu yhteen ja vain yhteen lohkoryhmään. Kuvan 4 mukaisesti arvolla 9 ei kaikkia lohkoja enää käytetä poikkeamien neliösumman estimoinnissa. Toisaalta on huomattava, että kuvan esimerkkialueelle sijoitetut 11 lohkoryhmää ei ole riittävä määrä käytännön laskentatyötä ajatellen. Inventoinnissa aktiivisten lohkoryhmien luku on ollut pienimmillään 89.

Kuten jo edellä todettiin, lohkojen lukumäärä lohkoryhmässä on ollut 4. Laskentakokeiluissa käytettiin myös kahden lohkon ryhmiä. Norjan metsien inventoinnin keskivirhelaskelmissa on päädytty kahden lohkon lohkokokonaisuuksiin (Takseringsresultater fra . . . 1970, s. 48).

Numeerisessa laskennassa ei kaavan (10) mukaisia z_h-arvoja käytetä. Tarkastellaan sen sijaan lohkoryhmän l kaavaa (11) vastaavaa T_l-arvoa muodossa

$$T_i = \frac{1}{4}(X_i^2 - 2\,X_i Y_i + Y_i^2),$$

jossa $$X_i = x_1 - x_2 - x_3 + x_4 \text{ ja}$$

$$Y_i = y_1 - y_2 - y_3 + y_4.$$

Jos palataan kuvan 2 esittämään tietokoneohjelmiston ajokaavioon, voidaan todeta, että lohkoryhmittäiset X_i ja Y_i-arvot saadaan RUUDUT-ohjelmalla. Ne säilytetään lohkoryhmätiedostossa II, joka on KVIRHE-ohjelman syöttötiedosto. KVIRHE-ohjelma kerää X_i ja Y_i-arvojen neliö- ja tulosummat yli aktiivisten lohkoryhmien sekä laskee lopulliset keskivirheet. Sitä varten sille on syötettävä perusalueittain parametritietoina

— tiedot metsämaan osuuden laskemiseksi,
— ryhmäkertoimen q arvo,
— maalinjametrien summa.

Keskiarvotunnusten (6)—(9) keskivirheiden määrittelyssä ovat voimassa samat periaatteet, jotka edellä on esitetty metsämaan osuuden keskivirheen laskemiseksi. Kun esimerkiksi keskikuutio estimoidaan kaavalla (7), käytetään sen keskivirhettä määrättäessä kaavaa (10) vastaavaa erotusta

$$z'_h = f \sum_j (U_{hj} - Vk_h) \qquad (h = 1,\ 2,\ 3,\ 4).$$

3222. Summatunnukset

Tarkasteltavat summatunnukset ovat metsämaan ala ja kokonaiskuutio. Jos kokonaismaa-ala A oletetaan tunnetuksi ja käytetään merkintöjä (3)—(5), saadaan metsämaan alaksi

$$M = mA.$$

Vastaavat keskivirheet voidaan laskea yhtälöistä

$$s_M = s_m A \text{ ja}$$

(13)

$$r_M = r_m.$$

Metsämaan kokonaiskuution antaa tulo

$$K = MV.$$

Jos metsämaan alan ja keskikuution arviot oletetaan toisistaan riippumattomiksi (M a t é r n 1947, s. 85), on kokonaiskuution keskivirhe laskettavissa kaavasta

$$r_K = \sqrt{r_M^2 + r_V^2}. \tag{14}$$

Kaavaa (14) on sovellettu inventoinnin keskivirhelaskelmissa. Riippumattomuusoletuksesta vapaa kokonaiskuution keskivirheen laskentamenetelmä löytyy B r a u n i n esityksestä (1969, s. 44). Se perustuu ajatukseen keskikuutiosta, joka saadaan jakamalla metsämaan puusto kokonaismaa-alalla. Inventointiaineiston taltiointitapa ei ole tehnyt mahdolliseksi tämän estimointivaihtoehdon käyttöä.

323. Keskivirheiden laskenta yhdistelyalueella

Määriteltäessä virhearvioita yhdistelyalueen tuloksille sovelletaan suoraan ositetun otannan keskivirheen laskennan kaavoja (vrt. esim. C o c h r a n 1963, s. 87). Yksilöidään käytetyssä alueosittelussa ositteet indeksillä p.

Yhdistelyalueen metsämaan alan ilmaisee yksinkertainen summa

$$M = \Sigma M_p. \tag{15}$$

Jos oletetaan ositteiden keskivirheet tunnetuiksi ja osittaiset otokset toisistaan riippumattomiksi, on metsämaan alan keskivirhe laskettavissa kaavasta

$$s_M = \sqrt{\Sigma\, s_{M_p}^2}. \tag{16}$$

Sijoittamalla tämä arvio yhtälöihin (13) saadaan metsämaasadannekseen liittyvät keskivirheet.

Kokonaiskuutiolle pätevät kaavoja (15) ja (16) vastaavat esitykset

$$K = \Sigma K_p \text{ ja} \tag{17}$$

$$s_K = \sqrt{\Sigma\, s_{K_p}^2}. \tag{18}$$

Keskikuution keskivirheen määrääminen yhdistelyalueelle ei sen sijaan onnistu näin yksinkertaisesti. Käyttökelpoinen menetelmä löytyy B r a u n i n (1969, s. 50) selostuksesta. Inventoinnissa kyseisen menetelmän käytön on estänyt sovellettu tietojen taltiointitapa.

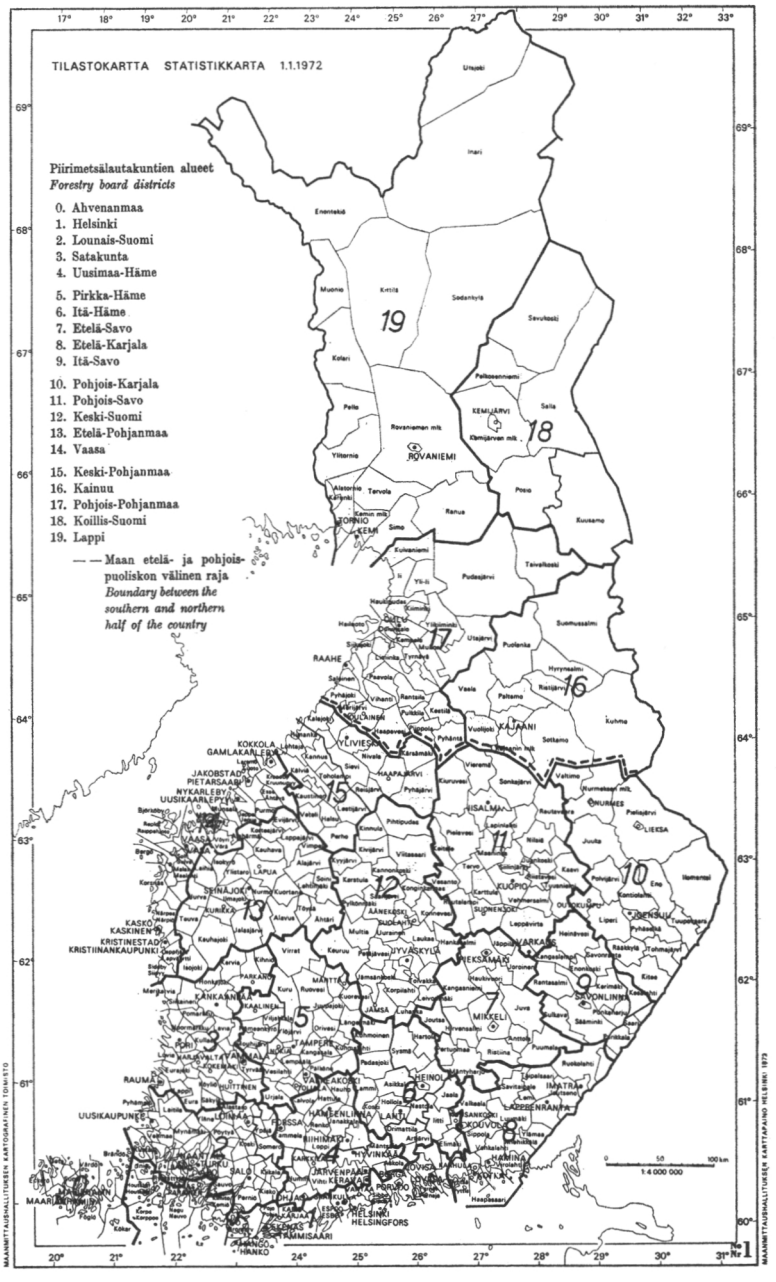
33. Lasketut keskivirheet

Keskivirheitä on määritetty vain metsämaata kuvaaville tunnuksille. On katsottu, että metsämaalle lasketut tiedot muodostavat niin keskeisen osan inventoinnin tuloksista, että luotettavuustarkasteluissa voidaan perustellusti rajoittua tähän maaluokkaan (vrt. s. 7). Lisätukena ratkaisulle mainittakoon, että Norjan ja Ruotsin metsävaratietojen luotettavuudesta on viime vuosina julkaistu lukuja, jotka lähinnä ovat verrattavissa meillä metsämaan tuloksille laskettuihin keskivirheisiin (Takseringsresultater fra ... 1970, s. 49; Ohlsson 1972). Suomessa III inventoinnin aineistosta tehdyt virhearviot on esitetty kasvullisen ja huonokasvuisen metsämaan muodostamalle kokonaisuudelle (Ilvessalo 1956, s. 197). Jos verrataan keskenään III ja V inventoinnin tulosten luotettavuutta, on muistettava, että keskivirhelaskelmien pohjana käytetty maaluokkajako ei ole ollut sama näissä inventoinneissa.

Metsämaalla luotettavuustarkastelut keskittyvät maata ja puustoa kuvaaviin päätunnuksiin. Metsämaasadanneksen ja metsämaan alan keskivirheet on koottu taulukkoon 1 ja keski- ja kokonaiskuution keskivirheet taulukkoon 2. Piirimetsälautakunnittaiset (kuva 5) virhearviot on — Lapin tulosten keskivirheitä lukuun ottamatta — tehty perusalueille esitetyn laskentamallin mukaisesti. Taulukkoihin liittyviin alahuomautuksiin viitaten Ahvenanmaan tulosten luotettavuudesta esitettyjä lukuja on pidettävä karkeina suuruusluokka-arvioina, koska ne eivät perustu Ahvenanmaan omien lohkojen kuvaamaan tunnusten satunnaisvaihteluun. Lappi on käsitelty yhdistelyalueena, jonka tunnuksille virhearviot on laskettu ositetun otannan kaavoja (16) ja (18) käyttäen lohkoinventoinnilla arvioidun alueen ja ilmakuva-alueen vastaavista keskivirheistä. Ilmakuva-alueen virhearviot on otettu menetelmäjulkaisusta (Poso & Kujala 1971, s. 23). Edelleen ositetun otannan kaavoja soveltaen on saatu maan etelä- ja pohjoispuoliskon ja koko maan tulosten luotettavuutta esittävät luvut. Tällöin alueosittelut on suoritettu piirimetsälautakuntien alueita tai inventointialueita (kuva 1) käyttäen. Yhdistelyalueille ei ole laskettu keskikuutioiden keskivirheitä.

Metsämaan alan koko maata koskeva keskivirhe on 86 000 ha. Metsämaasadanneksen vastaava suhteellinen keskivirhe on 0.5 %, ja jälkimmäinen kaavoista (13) osoittaa, että tämä arvio on samalla myös metsämaan alan suhteellinen keskivirhe. Lausekkeen (2) mukaiset koko maata koskevat metsämaan alan 95 %:n luottamusvälin päätepisteet ovat 18 697 000 ± 172 000 ha. Maan eteläpuoliskossa on metsämaan alan keskivirhe 54 000 ha ja pohjoispuoliskossa 67 000 ha. Vastaavat suhteelliset keskivirheet ovat 0.5 ja 0.9 %.

Kokonaiskuutiomäärän keskivirhe koko maassa on 10 000 000 m^3. Vastaava suhteellinen keskivirhe on 0.7 % ja 95 % :n luottamusvälin päätepisteet



Kuva 5. Piirimetsälautakuntien alueet sekä maan etelä- ja pohjoispuoliskon välinen raja.

Fig. 5. Forestry Board Districts and the boundary between the southern and northern half of the country.

Taulukko 1. Metsämaasadannes ja metsämaan ala keskivirheineen sekä mitattujen lohkojen lukumäärä eri piirimetsälautakuntien alueilla.

Table 1. Forest land percentage and area of forest land with respective mean errors and the number of measured tracts presented by Forestry Board Districts.

Piirimetsälautakunta *Forestry Board District*	Metsämaasadannes *Forest land percentage*	Metsämaasadanneksen *Forest land percentage* keskivirhe *mean error*		Metsämaan ala *Area of forest land*	Metsämaan alan keskivirhe *Mean errors of the area of forest land*	Lohkoja *Tracts*
		absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*			
			%	1 000 ha		kpl — *s*
0. Ahvenanmaa	36.9	1.3 [1]	3.4 [1]	55	2 [1]	347
1. Helsinki	53.7	1.7	3.2	352	11	192
2. Lounais-Suomi	48.9	1.6	3.4	455	15	174
3. Satakunta	61.9	1.6	2.6	637	17	184
4. Uusimaa-Häme	64.0	1.8	2.8	525	15	146
5. Pohjois-Häme	73.0	1.5	2.1	771	16	199
6. Itä-Häme	71.0	1.3	1.8	584	11	160
7. Etelä-Savo	78.1	1.0	1.3	770	10	206
8. Etelä-Karjala	71.5	1.5	2.1	598	12	171
9. Itä-Savo	80.7	1.2	1.5	503	8	138
10. Pohjois-Karjala	73.3	0.9	1.2	1 289	16	325
11. Pohjois-Savo	76.9	0.8	1.1	1 287	14	318
12. Keski-Suomi	79.9	0.7	0.8	1 222	10	283
13. Etelä-Pohjanmaa	58.7	1.5	2.5	853	21	243
14. Vaasa	62.6	1.8	2.8	420	12	151
15. Keski-Pohjanmaa	57.0	1.4	2.4	623	15	191
0—15. Eteläpuolisko *Southern half*	68.0	0.3	0.5	10 944	54	3 315
16. Kainuu	70.5	0.8	1.2	1 533	18	309
17. Pohjois-Pohjanmaa	57.4	0.8	1.4	1 386	19	334
18. Koillis-Suomi	60.6	1.0	1.7	1 553	26	239
19. Lappi	44.9	0.8	1.7	3 281	56	· [2]
16—19. Pohjoispuolisko *Northern half*	53.6	0.5	0.9	7 753	67	· [2]
0—19. Koko maa *Whole country*	61.2	0.3	0.5	18 697	86	· [2]

[1] Ahvenanmaan keskivirheet eivät perustu Ahvenanmaan omaan aineistoon, vaan ne on johdettu lohkolukumäärän perusteella Helsingin piirimetsälautakunnan vaihtelutunnuksista. *The mean errors for Ahvenanmaa have not been computed from the data collected in Ahvenanmaa but they have been derived on the basis of inventory tracts from the variable characteristics for the Forestry Board District of Helsinki.*

[2] Tieto on loogisesti mahdoton, koska Lapin piirimetsälautakunnan pohjoisosan inventoinnissa ei ole käytetty lohkonäytettä. — *The information is logically impossible because there was no tract sampling in the inventory of the northern parts of the Forestry Board District Lappi.*

Taulukko 2. Metsämaan kuorellinen keski- ja kokonaiskuutio keskivirheineen eri piirimetsälautakuntien alueilla.

Table 2. Overbark mean and total volumes on forest land with respective mean errors by Forestry Board Districts.

Piirimetsälautakunta *Forestry Board District*	Keskikuutio *Mean volume*	Keskikuution *Mean volume*		Kokonaiskuutio *Total volume*	Kokonaiskuution *Total volume*	
		absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*		absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*
		keskivirhe *mean error*			keskivirhe *mean error*	
	m³/ha		%	Milj. m³ *Mill. m³*	100 000 m³	%
0. Ahvenanmaa	115	2.5 [1]	2.2 [1]	6	3 [1]	4.1 [1]
1. Helsinki	111	3.4	3.0	39	17	4.4
2. Lounais-Suomi	98	1.8	1.8	44	17	3.8
3. Satakunta	82	1.6	2.0	52	17	3.3
4. Uusimaa-Häme	109	2.1	1.9	57	19	3.4
5. Pohjois-Häme	98	2.6	2.5	76	25	3.3
6. Itä-Häme	104	1.5	1.4	61	14	2.3
7. Etelä-Savo	106	1.6	1.5	82	16	2.0
8. Etelä-Karjala	97	2.1	2.2	58	18	3.0
9. Itä-Savo	101	2.1	2.1	51	13	2.6
10. Pohjois-Karjala	85	1.8	2.1	110	26	2.4
11. Pohjois-Savo	84	1.4	1.6	109	21	2.0
12. Keski-Suomi	81	1.6	2.0	99	21	2.2
13. Etelä-Pohjanmaa	74	1.5	2.0	63	20	3.2
14. Vaasa	91	2.5	2.8	38	15	4.0
15. Keski-Pohjanmaa	58	1.5	2.5	36	13	3.4
0—15. Eteläpuolisko *Southern half*	90	— [2]	— [2]	981	73	0.7
16. Kainuu	70	2.0	2.9	107	33	3.1
17. Pohjois-Pohjanmaa	51	1.4	2.7	71	22	3.0
18. Koillis-Suomi	51	1.8	3.5	79	31	3.9
19. Lappi	49	— [2]	— [2]	161	47	2.9
16—19. Pohjoispuolisko *Northern half*	54	— [2]	— [2]	418	68	1.6
0—19. Koko maa *Whole country*	75	— [2]	— [2]	1 399	100	0.7

[1] Ks. taulukko 1, alaviitta [1]. — *See Table 1, footnote [1].*

[2] Keskikuution keskivirheitä ei ole laskettu yhdistelyalueille. — *Mean errors for the mean volume have not been calculated for the pooled areas.*

ovat 1 398 900 000 ± 19 900 000 m³. Maan eteläpuoliskossa on kokonaiskuution keskivirhe 7 300 000 m³ ja pohjoispuoliskossa 6 800 000 m³. Vastaavat suhteelliset keskivirheet ovat 0.7 % ja 1.6 %.

Piirimetsälautakunnittaiset metsämaasadanneksen absoluuttiset keskivirheet vaihtelevat välillä 0.7—1.8 ja suhteelliset keskivirheet välillä 0.8—3.4 %. Pienimmillään ovat molemmat Keski-Suomessa. Absoluuttinen keski-

Taulukko 3. Metsämaan kuorellinen keskipohjapinta-ala ja pohjapinta-alalla punnittu kuorellinen keskiläpimitta keskivirheineen Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan ja Koillis-Suomen piirimetsälautakuntien alueilla.

Table 3. Overbark mean basal area and overbark mean diameter weighted by the basal area with respective mean errors for the Forestry Board Districts of Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa and Koillis-Suomi.

Piirimetsälautakunta *Forestry Board District*	Keskipohjapinta-ala *Mean basal area*	Keskipohjapinta-alan *Mean basal area*		Keskiläpimitta *Mean diameter*	Keskiläpimitan *Mean diameter*	
		absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*		absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*
		keskivirhe *mean error*			keskivirhe *mean error*	
	m^2/ha		%	cm		%
16. Kainuu	10.7	0.3	2.7	18.2	0.2	0.9
17. Pohjois-Pohjanmaa	9.3	0.2	2.3	15.5	0.2	1.3
18. Koillis-Suomi	8.6	0.3	3.2	20.1	0.2	1.1

virhe on suurimmillaan Uudenmaan-Hämeen ja Vaasan piirimetsälautakuntien alueilla ja suhteellinen keskivirhe Lounais-Suomessa.

Piirimetsälautakunnittaiset metsämaan keskikuution absoluuttiset keskivirheet vaihtelevat välillä 1.4—3.4 m^3 ja suhteelliset keskivirheet välillä 1.4—3.5 %. Absoluuttinen keskivirhe on pienimmillään Pohjois-Savossa ja Pohjois-Pohjanmaalla ja suurimmillaan Helsingin piirimetsälautakunnan alueella. Suhteellinen keskivirhe on pienimmillään Itä-Hämeessä ja suurimmillaan Koillis-Suomessa. Eteläpuoliskon suurin suhteellinen keskivirhe on 3.0 %. Tämä arvio on saatu Helsingin piirimetsälautakunnan alueelle. Lapin piirimetsälautakunnan alueelta keskikuution keskivirheitä ei ole laskettu. Lohkoinventointialueeseen IV kuuluvalla osa-alueella absoluuttinen keskivirhe on 1.4 m^3 ja suhteellinen 2.9 %.

Metsämaan kokonaiskuutiomäärän piirimetsälautakunnittaiset suhteelliset keskivirheet vaihtelevat välillä 2.0—4.4 %. Keskivirhe on suurimmillaan Helsingin piirimetsälautakunnan alueella ja pienimmillään Keski-Suomessa ja Etelä-Savossa.

Taulukkoon 3 on otettu esimerkkeinä keskipohjapinta-alan ja keskiläpimitan keskivirheitä muutamien pohjoisten piirimetsälautakuntien alueilta. Verrataan pohjapinta-alan virhearvioita taulukossa 2 esitettyihin vastaavien alueiden keskikuutioiden keskivirheisiin. Kaikilla esimerkkialueilla on keskipohjapinta-alan suhteellinen keskivirhe hieman pienempi kuin vastaava keskikuution virhearvio. Tulos lienee samansuuntainen esimerkkialueiden ulkopuolellakin. Niinpä jos jokin inventoinnin tuloksiin liittyvä tarkastelu voidaan tehdä yhtä hyvin pohjapinta-alatietojen kuin keskikuutiolukujenkin pohjalta, lienee perustellumpaa käyttää keskipohjapinta-alatietoja.

Taulukko 4. Metsämaan alan ja kuorellisen kokonaiskuutiomäärän keskivirheet inventointialueilla II—IV, kun inventointialueet on toisaalta tulkittu perusalueiksi ja toisaalta piirimetsälautakunnista muodostetuiksi yhdistelyalueiksi.

Table 4. Mean errors for the forest land area and the total overbark volume in inventory areas II—IV from interpretation of the inventory areas as basic areas, in one hand, and as pooled areas compiled from the Forestry Board Districts, on the other hand.

Lohko-inventointi-alue *Tract inventory area*	Tunnus *Characteristic*	Suhteellinen keskivirhe *Relative mean error*	
		Laskenta perusalueena *Calculation as basic areas*	Laskenta yhdistelyalueena *Calculation as pooled area*
		%	
II	1. Metsämaan ala *Area of forest land*	0.53	0.49
	2. Kokonaiskuutio *Total volume*	0.76	0.74
III	1. Metsämaan ala *Area of forest land*	0.90	0.91
	2. Kokonaiskuutio *Total volume*	2.23	2.23
IV	1. Metsämaan ala *Area of forest land*	1.32	1.28
	2. Kokonaiskuutio *Total volume*	2.59	2.57

Johdettaessa keskivirheiden laskentakaavoja yhdistelyalueen tunnuksille oletettiin, että ositteittaiset otokset ovat toisistaan riippumattomia. Vaadittu ehto on ilmeisesti täytetty, kun lasketaan yhteen tuloksia eri inventointialueilta. Vaikka lohkoinventointialueittaiset tunnusten keskivirheet ovat aina estimoitavissa perusalueelle esitettyä laskentamallia käyttäen, saadaan ne oleellisesti yksinkertaisemmin yhdistelyalueen kaavoja soveltaen, jos inventointialue on jaettu ositteisiin, joille on laskettu vastaavat tunnusten keskivirheet. Inventoinnissa on yleisesti käytetty tätä menettelyä. Ositteina ovat etupäässä olleet piirimetsälautakuntien alueet. Inventointialueen sisällä ositteittaiset otokset kuitenkin ovat yhden ja saman lohkoston osia, joten ne eivät ole toisistaan riippumattomia. Siksi on inventointialueittain varmistuttu siitä, että käytetty yksinkertainen ositevarianssien summaukseen perustuva menettely ei johda merkittävästi erilaisiin virhearvioihin kuin suoraan perusalueelle soveltuvaan menetelmään pohjautuva estimointi. Saadut tulokset on koottu taulukkoon 4. Molemmilla laskentatavoilla on päädytty käytännöllisesti katsoen samoihin tuloksiin. Laskenta yhdistelyalueina johtaa kuitenkin jonkin verran pienempiin keskivir-

Taulukko 5. Maapinta-alaltaan 200 000 hehtaarin suuruisten alueiden metsämaan alan ja keski- ja kokonaiskuution keskimääräiset keskivirheet sekä keskimääräinen lohkolukumäärä eri piirimetsälautakuntien alueilla.

Table 5. Average errors of the forest land area as well as of the mean and total volumes on forest land and the average number of tracts in areas with a total area of 200 000 ha by Forestry Board Districts.

Inventointialue *Inventory area*	Piirimetsälautakunta *Forestry Board District*	Metsämaan — *Forest land*						Lohkoja *Tracts*
		alan *Area*		keskikuution *Mean volume*		kokonaiskuution *Total volume*		
		absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*	absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*	absoluuttinen *Absolute*	suhteellinen *Relative*	
		keskivirhe — *mean error*						
		1 000 ha	%	m³/ha	%	Milj. m³ *Mill. m³*	%	kpl — *s*
II	1. Helsinki	6	6	6	6	10	8	59
	2. Lounais-Suomi	7	7	4	4	8	8	37
	3. Satakunta	7	6	4	4	8	7	36
	4. Uusimaa-Häme	7	6	4	4	10	7	36
	5. Pohjois-Häme	7	5	6	6	11	8	38
	6. Itä-Häme	5	4	3	3	7	5	39
	7. Etelä-Savo	4	3	4	3	7	4	42
	8. Etelä-Karjala	6	4	4	4	9	6	41
	9. Itä-Savo	4	3	4	4	7	5	44
	10. Pohjois-Karjala	5	4	5	6	9	7	37
	11. Pohjois-Savo	5	3	4	5	7	6	38
	12. Keski-Suomi	4	2	5	6	8	6	37
	13. Etelä-Pohjanmaa	8	7	4	6	8	9	33
	14. Vaasa	6	5	5	5	8	7	45
	15. Keski-Pohjanmaa	6	6	3	6	5	8	35
III	16. Kainuu	5	4	7	10	10	10	28
	17. Pohjois-Pohjanmaa	6	5	5	9	6	10	28
IV	18. Koillis-Suomi	7	6	6	12	9	14	19

heisiin. Syynä voi olla mainittu riippuvuus, mutta yhtä hyvin ero voi aiheutua esimerkiksi käytetyn osittelun aiheuttamasta vähäisestä tulosten tarkentumisesta.

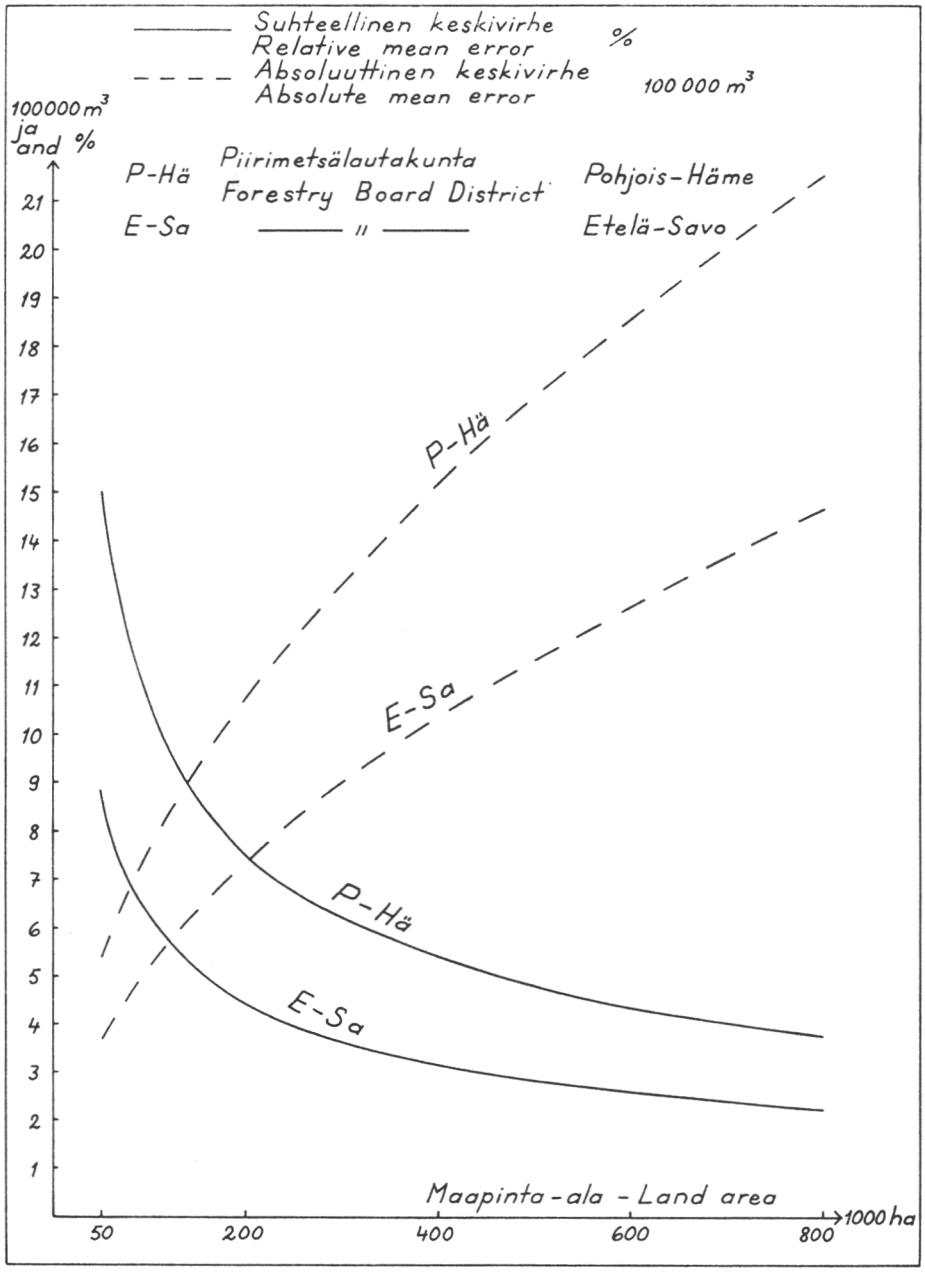
Inventoinnin tulosten luotettavuuden esittely on toistaiseksi rajoittunut piirimetsälautakunnittaisen alueosittelun puitteisiin. Tämä ei kuitenkaan riitä kattamaan virhearvioiden koko tarvetta, koska tietoja on laskettu runsaasti muitakin aluejakoja käyttäen. Suoraan maastoaineistoon perustuvien virhelaskelmien teko kaikkien laskenta-alueiden päätunnuksille on liian suuritöistä. Siksi luotiin oikomenettely, jonka avulla muutamille päätunnuksille saadaan keskivirheiden suuruusluokkaa osoittavat arviot, jos vain tunnetaan alueen maapinta-ala. Arviot perustuvat yhden lohkon edusta-

miin osuuksiin piirimetsälautakunnittaisista kokonaismaa-aloista ja satunnaisvaihteluun liittyvistä neliösummista. Taulukkoon 5 on koottu näitä lähtötietoja käyttäen lasketut, 200 000 hehtaarin maapinta-alaa edustavat, standardoidut keskivirheet. Kukin taulukosta otettu keskivirhe kuvaa virhearviota mainitun kokoisella kuvitellulla alueella, jolla edellä mainitut lohkokohtaiset lähtötiedot ovat samat kuin ne ovat kyseisen keskivirheen edustaman piirimetsälautakunnan koko alueella. Kun halutaan arvio keskivirheiden suuruusluokasta maapinta-alaltaan A hehtaarin suuruiselle alueelle, valitaan taulukosta aluetta edustava piirimetsälautakuntarivi ja jaetaan riviltä saatavat standardoidut keskivirheet suureella

$$\sqrt{\frac{A}{200\,000}}.$$

Jos esimerkiksi A:lla on arvo 800 000, ovat alueen tunnusten virhearviot puolet taulukossa esitetyistä luvuista. Inventoinnin tulosten laskenta-alueet on valtaosin koostettu kuntia perusyksikköinä käyttäen. Täten niiden maapinta-alat tunnetaan ja esitettyä menetelmää voidaan soveltaa niille laskettujen tulosten luotettavuuden tarkasteluun. Kuvatulla oikomenettelyllä Pirkka-Hämeestä ja Etelä-Savosta lasketut keskivirheet on maapinta-alan funktiona piirretty kuvaan 6.

Taulukossa 5 esitetyt standardoidut keskivirheet eroavat huomattavasti toisistaan piirimetsälautakunnittain. Valtaosin tulokset ovat odotettuja, mutta muutamia kokonaiskuvaan vaikeastikin sijoittuvia virhearvioita taulukossa esiintyy. Näiden kohdalla on muistettava, että keskivirheetkin ovat estimaatteja eivätkä todellisia hajontalukuja, joten sattumakin voi olla syynä joihinkin poikkeuksellisiin arvioihin. Standardoitujen metsämaan alan keskivirheiden vertailu taulukossa 1 esitettyihin metsämaasadanneksiin osoittaa, että suuri hehtaareissa ilmaistu metsämaan alan virhearvio liittyy yleensä pieneen metsämaasadannekseen. Poikkeuksia ovat Pirkka-Hämeen ja Etelä-Karjalan alueet, joilla joko sattuma tai todella naapurialueita suurempi metsämaan osuuden vaihtelu on aiheuttanut suuren kyseisen virhearvion, vaikka koko alueen metsämaasadannes onkin korkea. Keskikuution kuutiometreinä ilmaistu keskivirhe on suurimmillaan Pohjois-Hämeessä sekä Helsingin ja Vaasan piirimetsälautakuntien alueilla. Rannikkolautakuntien alueiden pitkä ja kapea muoto sekä rannikon rikkonaisuus riittävät niillä selittämään virhearvioiden suuruuden. Pirkka-Hämeen iso virhearvio voi jälleen johtua sattumasta, mutta on myös mahdollista, että avohakkuu on siellä yleisempi metsien uudistushakkuutapa kuin muiden eteläisten lautakuntien alueilla. Suhteellisen suuri on keskikuution keskivirhe vielä kautta linjan alueilla, joilla aukeiden alojen ja taimistojen osuus on korkea (vrt. kartta 2). Kokonaiskuution standardoitu suhteellinen keskivirhe



Kuva 6. Kokonaiskuution suhteellinen ja absoluuttinen keskivirhe maapinta-alan funktiona Pohjois-Hämeen ja Etelä-Savon piirimetsälautakuntien alueilla.

Fig. 6. Relative and absolute mean errors of the total volume as a function of the land area in the Forestry Board Districts Pohjois-Häme and Etelä-Savo.

vaihtelee maan eteläpuoliskossa välillä 4—9 % ja pohjoispuoliskossa välillä 10—14 %.

Keskivirheiden ohella taulukossa 5 on annettu piirimetsälautakunnittain keskimääräiset lohkolukumäärät maapinta-alaltaan 200 000 hehtaarin suuruisilla alueilla. Lukumääräerojen pääsyy inventointialueelta toiselle siirryttäessä on lohkojen keskinäisen etäisyyden muuttuminen. Inventointialueen sisällä erot johtuvat siitä, että vesialan osuus ei ole sama eri piirimetsälautakuntien alueilla.

Rajoitetaan toisaalta samanaikainen tarkastelu koskemaan aina kerrallaan niiden piirimetsälautakuntien alueita, joilla taulukosta 5 luetut lohkolukumäärät ovat likimain samat. Näillä yhtä suuria maapinta-aloja vastaavat kokonaispinta-alat eivät oleellisesti poikkea toisistaan, ja siksi niillä yhden lohkon inventointikustannukset ovat samaa suuruusluokkaa. Tällaisen lautakuntaryhmän sisällä taulukosta otetut virhearviot ovat käytettävissä karkeisiin, tulosten luotettavuudenkin huomioon ottaviin kustannusvertailuihin.

34. Keskivirheiden käyttöön liittyviä näkökohtia

Suomen, Ruotsin, Norjan ja Itävallan metsien inventointeihin liittyvät tulosten luotettavuustarkastelut on viime aikoina suoritettu periaatteessa samaa menetelmää soveltaen (Matérn 1960; Takseringsresultater fra . . . 1970; Braun 1969). Tätä voitaneen pitää vahvana suosituksena menetelmän käyttökelpoisuudesta. Matemaattisesti on lohko-otoksesta tehtävässä tunnusten keskivirheiden laskennassa pääongelmana systemaattisen vaihtelun eliminointi kokonaisvaihtelusta. Jos tämä ei täysin onnistu, ovat estimoidut keskivirheet vastaavien hajontojen yli- tai aliarvioita. Jos esimerkiksi kaavan (11) kaltaisessa neliömuodossa otosyksiköiden keskinäinen etäisyys on hyvin pieni, on olemassa ilmeinen aliarvioinnin vaara. Käytännön sovellutuksissa yliarviointi lienee tavallisempaa (Ilvessalo 1956, s. 195). Tukena tälle käsitykselle voidaan mainita, että tutkiessaan koealaotannan luotettavuutta menetelmällä, jota inventoinnissa on käytetty lohkoinventoinnin keskivirheiden laskentaan, Nyyssönen, Kilkki & Mikkola (1967, s. 44) toteavat, että menetelmä »may be sufficiently precise in the cases which appear most frequently in practise, although they seem to overestimate the error, and are consequently on the safe side». Lohkoinventoinnissa riippuu sekä lohkojen koosta ja muodosta että niiden keskinäisestä etäisyydestä, ovatko tuloksille lasketut keskivirheet systemaattisesti virheellisiä arvioita. Lisäksi näiden tekijöiden merkitys vaihtelee alueittain. Kokonaisuutena katsoen sovellettu keskivirheiden laskentamenettely mieluummin yliarvioinee kuin aliarvioinee hajontoja. Pääperusteena tähän

arveluun on lohkojen suuri keskinäinen etäisyys kaikilla lohkoinventointialueilla.

Inventoinnin tuloksiin mahdollisesti sisältyvät systemaattiset virheet heikentävät tulosten tarkkuutta. Meillä Koivisto (1965) on tutkinut, kiertääkö inventointiryhmä tiheitä puurykelmiä niin selvästi, että sillä on vaikutusta inventoinnissa saataviin kuutiomäärätietoihin. Selvityksen mukaan linjan polveilu ei sanottavasti vaikuta tuloksiin käytettäessä inventoinnissa sovellettuja koealakokoja. Janz (1970, s. 26) on Ruotsin inventoinnista todennut, että jos ryhmien annetaan mitata samoja lohkoja, eri ryhmien saamat lohkoittaiset »metsämaan alan» ja keskikuution arviot poikkeavat melkoisesti toisistaan. Mainitussa tutkimuksessa on edelleen osoitettu, että suurten alueiden yksikkökuutioiden käyttö voi johtaa selviin systemaattisiin virheisiin pienillä osa-alueilla ja puustoltaan poikkeuksellisissa ositteissa. Vastaavaa systemaattista virhettä esiintynee myös V inventoinnin tuloksissa; esimerkiksi metsämaan keskikuutiot piirimetsälautakuntatasolla ja sitä pienemmillä alueilla voivat olla osittain systemaattisesti virheellisiä.

Esitettyjen näkökohtien perusteella keskivirheet kuvaavat lähinnä satunnaisvaihtelun suuruusluokkaa. Niillä on ollut käyttöä erityisesti uuden inventoinnin suunnitteluvaiheessa. Toisaalta niiden antaman informaation avulla on voitu päätellä, kuinka pienille alueille inventoinnin aineistosta on mielekästä laskea tuloksia.

4. KARTAT

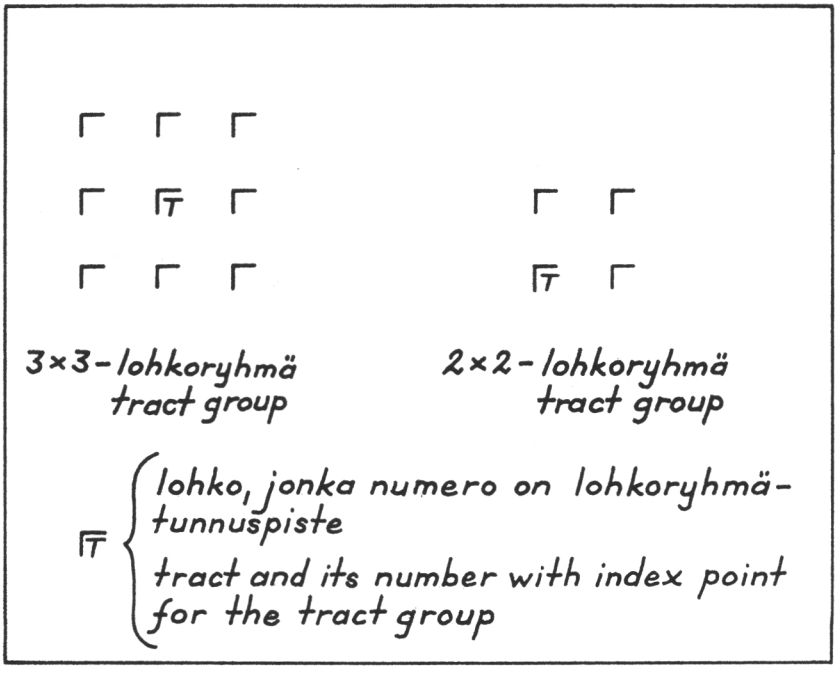
41. Karttojen valmistusmenetelmä

Alueelle säännöllisesti sijoitettu, tason pisteinä numeroitu lohko-otos tarjoaa mahdollisuuden seurata tunnusten vaihtelua inventointialueen eri osissa. Jos tarkastellaan lohkoa kerrallaan, on satunnaisvaihtelun vuoksi vaikeata saada käsitystä tunnusten systemaattisesta muuttumisesta. Satunnaisvaihtelua voidaan pienentää siirtymällä lohkoryhmittäin laskettujen tunnusten estimaatteihin. Jos nämä luokitellaan, tarkentuu kuva systemaattisesta vaihtelusta entisestään. Luonnollisimmin se on esitettävissä karttamuodossa. Karttojen tekoa varten on tunnuksittain etsittävä tarkoituksenmukaiset luokituksen ja lohkoryhmien väliset yhdistelmät.

Edellä esitettyä ajatuskulkua on sovellettu luotaessa karttoja inventoinnin aineistosta. Lohkojen keskinäisen etäisyyden muuttuminen inventointialueelta toiselle siirryttäessä on pakottanut tekemään aluksi kultakin inventointialueelta (kuva 1) omat karttansa, joista on yhdistetty koko maata kuvaavat esitykset. Karttojen valmistamiseen liittyviä työvaiheita selostettaessa käytetään vastaavaa järjestystä: ensin käsitellään inventointialueittaisten karttojen teko ja sitten niiden yhdistäminen.

Lohkoinventointialueilla tietokonetulostuksena saatavat kartat luodaan ohjelmalla KARTTA. Kuvan 2 mukaisesti ohjelman syöttötiedostona on lohkoryhmätiedosto I, joka luodaan RUUTU-ohjelmalla. Tiedostoa luotaessa kuuluvat lohkoryhmätunnuspisteistöön (vrt. s. 11) kaikki käsittelyn kohteena olevan inventointialueen lohkot. Täten jokaiseen lohkonumeroon liitetään oma lohkoryhmänsä. Kuvassa 7 on esitetty kartta-ajoissa kokeillut lohkoryhmävaihtoehdot. 3×3-lohkoryhmä muodostuu täydellisenä yhdeksästä ja 2×2-lohkoryhmä neljästä lohkosta. Epätäydellisiä lohkoryhmiä voi esiintyä alueen rajoilla sekä suurten järvien yhteydessä. Tiedoston tietueilla käytetyt lohkoryhmittäiset summatiedot ovat linjametri-, yksikkökuutio-, läpimitta- tai puiden lukumääräsummia.

Karttatulostuksena tarkastellaan erilaisten keskiarvoestimaattien systemaattista vaihtelua. KARTTA-ohjelma laskee tarvittavat lohkoryhmittäiset suhde-estimaatit. Ohjelma käsittelee yhtä tunnusta kerrallaan. Osoit-



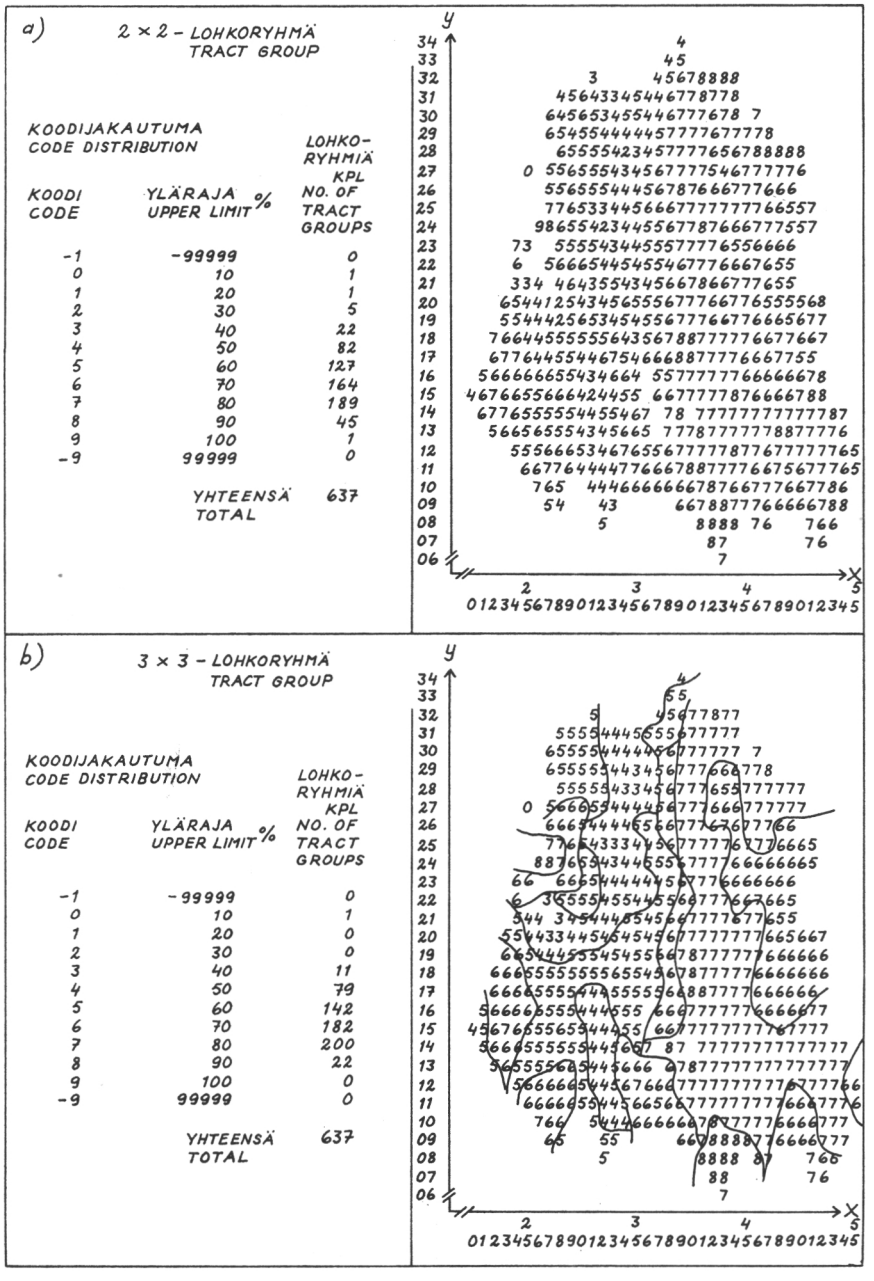
Kuva 7. Karttoja valmistettaessa käytetyt lohkoryhmävaihtoehdot.
Fig. 7. Tract group alternatives used in preparation of the maps.

taja- ja nimittäjäsummakenttien sijainti syöttötietueilla samoin kuin mahdollinen vakiokerroin ilmoitetaan ohjelmalle parametritietona. Laskettuja estimaatteja ei tulosteta sellaisinaan, vaan ne luokitellaan ja muutetaan yksimerkkiseen koodimuotoon. Lohkoryhmittäiset koodit talletetaan keskusmuistiin lohkoryhmätunnuspisteen numeron mukaan. Kun kaikkia lohkoryhmiä koskevat koodit on laskettu, tulostetaan koodimuodossa oleva kartta.

Tietokonetulostuksena saatavista kartoista nähdään esimerkkejä kuvassa 8. Kuvaan on liitetty koodiselitykset ja koodien frekvenssijakaumat. Numerokoodien luokkarajat annetaan ohjelmalle parametrikortilla. Numerokoodin x saavat ne lohkoryhmät, joilla estimaatin arvo on välillä

koodin $(x-1)$ yläraja $<$ estimaatti $\leq$ koodin x yläraja.

Lohkoryhmä, jolla estimaatin arvo on 0, saa myös koodikseen merkin 0. Kirjainkoodi *J* tulee lohkoryhmille, joilla on maalinjametrejä, mutta joille tarkasteltavaa estimaattia ei voida laskea. Jos esimerkiksi lohkoryhmässä ei ole mitattu yhtään puustokoealaa, sille ei voida estimoida keskikuutiota.



Kuva 8. Jäljitelmä tietokoneella saatavasta metsämaasadanneksen karttatulostuksesta lohkoinventointialueella III (Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun piirimetsälautakuntien alueet).

Fig. 8. A simulation of the computer map output for the forest land percentage in Tract Inventory Area III (Forestry Board Districts Pohjois-Pohjanmaa and Kainuu).

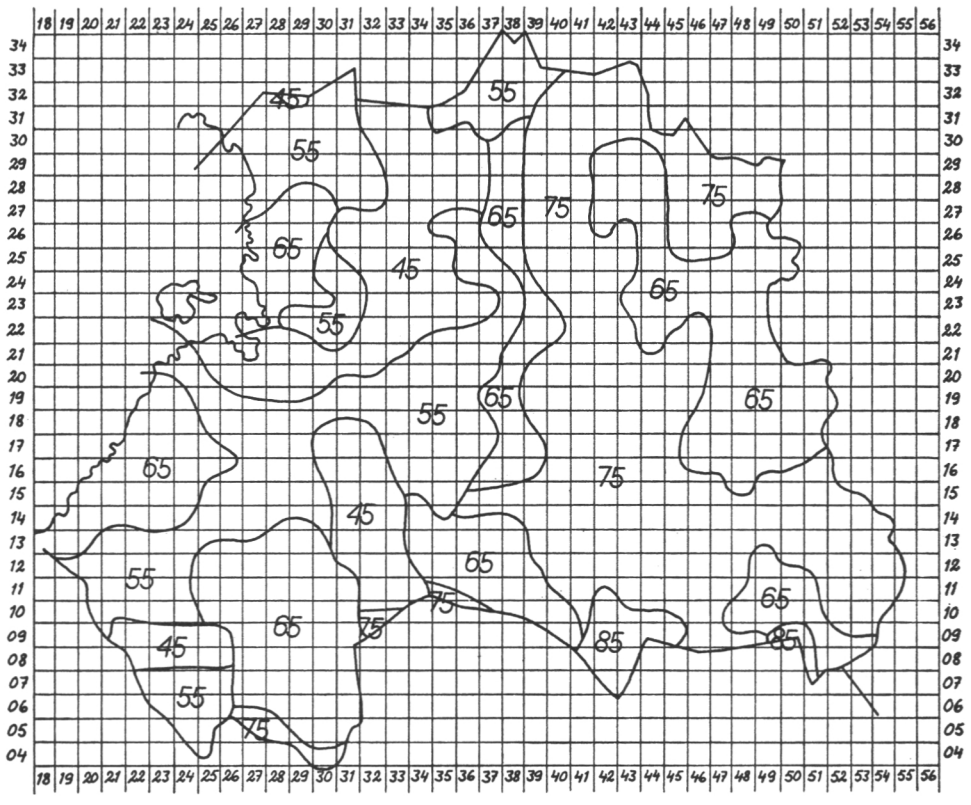
Kirjainkoodin *R* saavat lohkoryhmät, joilla estimaatin arvo on suurempi kuin suurimman numerokoodin yläraja. Jos karttatulostuksessa tarvitaan enemmän kuin 10 numerokoodia, on kartta rakennettava useampana ajovaiheena. Esimerkkikuvassa on metsämaasadanneksen alueittainen jakaantuminen Pohjois-Pohjanmaan ja Kainuun piirimetsälautakuntien alueilla. Numerokoodien luokkaväli on 10 %. Valitussa tulostusvaihtoehdossa ei kirjainkoodeja voi esiintyä. Tyhjät ruudut karttatulostusalueen keskellä kuvaavat lohkoryhmiä, joiden lohkoryhmätunnuspistettä vastaava lohko on kokonaan vettä.

Kuvan 8 mukaisen karttatulostuksen voidaan tulkita esittävän tarkasteltavan estimaatin kaksiulotteista liukuvaa keskiarvoa. Kuva on lohkoinventointialueelta III. Täällä lohkojen keskinäinen etäisyys on 9 km. 2 × 2-lohkoryhmiä käytettäessä kartta kuvaa metsämaasadannesarvioita ruuduissa, joiden sivun pituus on 18 km. 3 × 3-lohkoryhmillä työskenneltäessä on vastaava sivun pituus 27 km.

Kuvassa on 3 × 3-lohkoryhmityksen mukaiseen karttaan hahmoteltu kuviot, joilla metsämaasadanneksen on katsottu kuuluvan samaan koodiluokkaan. Vastaava kuviohahmottelu olisi ollut paljon vaikeampi tehdä karttaan, joka kuvaa 2 × 2-lohkoryhmistä laskettuja estimaatteja. Erot vertailtavien lohkoryhmien tasoituskyvyssä ilmenevät myös kuvaan liitetyistä frekvenssijakaumista. 3 × 3-lohkoryhmän jakauma on selvästi huipukkaampi kuin 2 × 2-lohkoryhmän jakauma. 3 × 3-lohkoryhmitys näyttää 10 %:n luokkaväliä käytettäessä eliminoivan metsämaasadanneksen vaihtelua riittävästi. Muitakin tunnuksia kuvaavilla kartoilla luokkajako on valittu sellaiseksi, että kaikki lopulliset kartat on voitu tehdä tätä lohkoryhmittelyä käyttäen. 2 × 2-lohkoryhmiä on sovellettu vain kokeiluissa.

Molemmista kuvan 8 kartoista nähdään, että alueen rajoilla on enemmän yksittäisiä, ympäristöstä poikkeavia arvoja kuin alueen keskustassa. Edellä todettiin, että rajoilla esiintyy yleensä epätäydellisiä lohkoryhmiä. Tämä selittää poikkeamien esiintymisrunsauden. Kuvioita muodostettaessa ei epätäydellisten lohkoryhmien estimaateilla ole katsottu olevan samaa informaattiarvoa kuin täydellisten lohkoryhmien estimaateilla.

Kuvan 8 kartat eivät ole pituus- ja leveyssuunnassa samassa mittakaavassa. Tulostus on tehty käytetyn rivikirjoittimen tarjoamien mahdollisuuksien perusteella. Yksinkertaisella kuvan 9 tapaisella ruudustolla on tietokoneella saatu kartta sidottu tarkasti mittakaavaan 1 : 2 000 000. Kuvaan on siirretty kuviohahmottelut kuvasta 8b. Lohkoinventointialueiden II ja IV vastaisilla rajoilla on kuvioiden muodostamisessa otettu huomioon näiden alueiden vastaavista kartoista saatava informaatio. Liian pieniksi katsotut kuviot on tässä vaiheessa poistettu. Lisäksi on koodien sijasta kuvioille merkitty sen metsämaasadannesluokan keskipiste, jonka katsotaan karakterisoivan kyseistä kuviota.



Kuva 9. Esimerkki kuvan 8 b kartan sitomisesta määrättyyn mittakaavaan.
Fig 9. An example of the fitting of the map in fig. 8 b to a given scale.

Ilmakuva-alueelta ei tietokoneella ole tehty varsinaista karttatulostusta Ns. tulostusnauhalta (P o s o & K u j a l a 1971, s. 18) on tietokoneella ilmakuvittain listattu tarkasteltavan estimaatin arvot ja nämä siirretty käsityönä karttaan. Saadut tulokset on sopivasti ryhmitelty kuvioiksi. Liukuvaa keskiarvoa ei ole käytetty.

Samaan mittakaavaan piirretyt inventointialueittaiset kartat on yhdistetty koko maata kuvaaviksi kartoiksi. Ne on valokuvattu kuntarajoilla ja -nimillä varustetun kartan kanssa. Näin on helpotettu karttakuvoiden paikallistamista. Edellä esimerkkinä kuvattu kartta on lopullisessa muodossaan osa julkaistua metsämaasadanneskarttaa (kartta 1).

42. Selostus tehdyistä kartoista

421. Karttoja koskevia yleistietoja

Valmistetuilla kartoilla käsitellään yksinomaan metsämaata kuvaavia tunnuksia (vrt. s. 7). Asiasisältönsä perusteella kartat voidaan jakaa pinta-alaosuus- ja puustokarttoihin. Viimeksimainittujen osalta todettakoon, että inventoinnissa on puustoon luettu kaikki puut, joiden rinnankorkeusläpimitta on vähintäin 2.5 cm. Ahvenanmaa ja eräiden tunnusten osalta myös ilmakuva-alue ovat jääneet karttatarkastelun ulkopuolelle.

Kuhunkin karttakuvioon on liitetty numero, joka ilmoittaa luokan, johon tarkasteltavan tunnuksen katsotaan kuuluvan tällä kuviolla. Kaikissa kartoissa numero esittää edustamansa luokan keskipistettä ja antaa suoraan mielikuvan tunnuksen suuruusluokasta kyseisellä kuviolla.

Kartoissa on pyritty tarvittaessa esittämään tunnusten arvioiden muuttumista suhteellisen pieninkin kuvioin. Jos tietokonetulostuksena saadussa kartassa on sama koodiarvo vähintäin kuudella, kuvioksi yhdistettävissä olevalla lohkolla, on lohkoista tehty oma kuvionsa. Tunnusten arviot perustuvat tällöin kuudesta lohkoryhmästä 1. 15—20 lohkolta laskettuihin tietoihin. Tämän lohkolukumäärätiedon perusteella on taulukosta 5 saatavia standardoituja keskivirheitä käyttäen johdettavissa keskimääräisiä virhearvioita näiden kuvioiden päätunnuksille. Jäljempänä esitetään muutamia kyseisiä keskivirheitä. Tässä yhteydessä todetaan vain yleisesti, että pienet kuviot kartoilla eivät aina ole todellisia, vaan osittain niiden muodostuminen on voinut aiheutua sattumasta.

Kartoilla on kuvioryhmiä, joiden sisällä erot jonkin tunnuksen arvioissa ovat poikkeuksellisen korkeat aivan viereisilläkin kuvioilla. Kovin jyrkät muutokset eivät luonnossa yleensä liene todellisia. Useimmiten tällaisia kuvioita sitonee toisiinsa liittymävyöhyke, joka on niin kapea, että se ei näy kartasta. Jotkut jyrkät erot johtunevat myös siitä, että viereisillä kenttätyöalueilla työskennelleillä ryhmänjohtajilla on ollut erilaiset tulkinnat jonkin luokituksen perusteista.

Monet valtakunnan metsien III inventoinnin tuloksia esittelevän karttajulkaisun (Ilvessalo 1960) kartat antavat riittävän tarkan käsityksen kuvaamansa tunnuksen alueellisesta vaihtelusta vielä V inventoinnin suoritusajankohtanakin. Tästä syystä uusia karttoja tehtäessä on keskitytty valtaosin tunnuksiin, joista ei aikaisempaa karttaesitystä ole. Kuitenkin molemmissa karttaryhmissä on mukana muutamia karttoja, joiden kuvaamat tunnukset ovat käsitteinä likimain samat. Näitä karttoja verrataan toisiinsa tunnuksia karttakohtaisesti tarkasteltaessa. Tässä yhteydessä vain todetaan, että uudet kartat ovat kuvioinniltaan selvästi pienipiirteisempiä

kuin III inventoinnin kuvaukset. Ilvessalo (1960, s. 10) mainitsee, että III inventoinnin kartoissa on pyritty »välttämään lukuisien pienien ja rinnakkaisina vain vähän ja epävarmasti toisistaan eroavien alueiden muodostumista». Tämä osoittaa, että pienien kuvioiden osalta kuvioiden muodostamisperiaatteet ovat lähes vastakkaiset vertailun kohteena olevilla karttaryhmillä.

422. Pinta-alaosuuskartat

4221. Metsämaasadanneskartta

Metsämaan osuutta kokonaismaa-alasta kuvataan kartassa 1. Kartalla käytetty luokkaväli on sadanneksina ilmaisten 10.

Taulukkoon 5 kootuista metsämaan alan standardoiduista keskivirheistä voidaan päätellä, että kuuden lohkon muodostaman kuvion metsämaasadanneksen keskimääräinen suhteellinen keskivirhe vaihtelee välillä 3—12 %. Suurimmassa osassa maata virhe on oleellisesti pienempi kuin 10 %. Tästä syystä näinkin pienillä karttakuvioilla on katsottu olevan oma informaatioarvonsa.

Metsämaasadannes maan eteläpuoliskossa on 68 ja pohjoispuoliskossa 54. Taulukossa 1 on esitetty vastaavat piirimetsälautakunnittaiset arviot. Kartan korkein metsämaasadannes tavataan pieneltä kuviolta Heinäveden ja Liperin raja-alueelta. Sadannesluokkana ilmaisten tämä korkein arvo on 95. Kainuussa ja laajoilla alueilla maan eteläpuoliskon itä- ja keskiosissa metsämaasadannes vaihtelee välillä 70—90. Rannikkoalueilla sekä Lapissa ja Koillis-Suomessa ylletään näin korkeisiin sadanneksiin vain pienehköillä alueilla. Pinta-alaltaan laajin näistä on välittömästi Inarinjärven eteläpuolella sijaitseva kuvioryhmä. Yleisimmät sadannesluokat kahden pohjoisimman lautakunnan alueilla ovat 55 ja 65. Ilmakuva-alueen pohjoisosassa on pari kuviota, joille sadannesluokaksi on merkitty 5. Todellisuudessa näillä alueilla lienee metsämaata häviävän vähän. Mainittuja kuvioita lukuunottamatta on kartan alin metsämaasadannesluokka 35. Tämä arvio tavataan vähäiseltä Helsinkiä ympäröivältä kuviolta.

Metsämaakartalla on samat pääpiirteet kuin Ilvessalon (1960, kartta 2) kasvullisen metsämaan osuutta kuvaavalla kartalla. Koko maassa oli kasvullisen metsämaan osuus III inventoinnissa 57 % ja metsämaasadannes V inventoinnissa 61. Ero ilmenee kartoista vähäisenä sadannesluokkien muuttumisena. Kuvioita V inventoinnin aikaista tilannetta esittävässä kartassa on likimain 90, kun niitä III inventoinnin vastaavassa kuvauksessa on noin 30. Tämä esimerkki riittänee osoittamaan kuvioiden muodostamisperiaatteiden erilaisuuden tarkasteltavien inventointien aineistoista tehdyissä kartoissa.

4222. Kehitysluokkakartat

Kehitysluokkien osuuksia on kuvattu kartoilla 2 ja 3. Nämä kuvaukset eivät sisällä ilmakuva-aluetta koskevia tietoja. Luokkaväli kyseisillä kartoilla on 10 %.

Kartasta 2 nähdään aukeiden alojen ja taimisto- ja riukuvaiheen metsiköiden yhteinen osuus metsämaan alasta. Inventoinnin kehitysluokkanumeroinnin mukaan (Kuusela & Salminen 1969, s. 27) on kyse kehitysluokista 1—3. Siemenpuumetsiköt kuuluvat kehitysluokkaan 1, mutta suojuspuumetsiköt eivät ole mukana kartan luvuissa.

Kehitysluokkien 1—3 osuus voi kestävyyden vaarantumatta Kuuselan (1970, 1972) mukaan nousta 27—30 %:iin. Tarkastellaan kartasta saatavaa informaatiota tätä taustaa vasten.

Maan pohjoispuoliskossa on kyseisiä metsiköitä metsämaan alasta 35 %. Kartasta voidaankin todeta ilmeinen ylihakkuu lähes koko tällä alueella. Jos kehitysluokkien 1—3 sadannesosuus kiipeää numeroihin 40—70, on liikahakkuu jo melko rajua. Alueita, joilla metsätase on tasapainossa tai joille on syntynyt hakkuusäästöä, on pohjoispuoliskossa suhteellisen rajoitetusti. Laajimmat näistä ovat kapeahko vyöhyke ilmakuva-alueen eteläpuolella, Pohjois-Pohjanmaan eteläosat sekä Utajärven itäosista Suomussalmelle ulottuva karttakuvio.

Maan eteläpuoliskossa on tarkasteltavien kehitysluokkien osuus 27 %. Selviä ylihakkuualueita ovat Keski-Suomi välittömine ympäristöineen, Pohjois-Savon ja Pohjois-Karjalan rajaseutu sekä Ilomantsin ja Pielisjärven pitäjät. Viimeksi mainittujen pitäjien raja-alueella kehitysluokkien 1—3 sadannesluokka yltää jopa arvoon 65. Karkeasti hahmoteltuina hakkuusäästöalueina voidaan pitää Pohjois-Savon eteläosasta Lappeenrantaan ulottuvaa vyöhykettä, Vaasan ympäristöä, Kotkan ja Tammisaaren väliseltä rannikkokaistalta luoteeseen Ikaalisiin ja Mänttään yltävää aluetta ja lounaista saaristoa. Muualla eteläpuoliskossa hakkuumahdollisuudet on käytetty hyväksi tai on syntynyt lievää hakkuusäästöä. Kartalla näkyvät pienet ja epävarmoina pidettävät ylihakkuu- tai hakkuusäästökuviot eivät tätä yleiskuvaa muuta.

Kartta 3 esittää puustoisten, vajaatuottoisten metsiköiden osuutta metsämaan alasta. Inventoinnin kehitysluokkajaottelun mukaan (Kuusela & Salminen 1969, s. 27) on kyse kehitysluokasta 8. Aukeat, vajaatuottoisiksi luokitellut metsiköt eivät ole mukana kartan luvuissa. Kehitysluokan 1 metsikköinä ne kuuluvat kokonaisuuteen, jonka osuuksia on kuvattu kartassa 2.

Vajaatuottoisuuden määrittelyssä voi esiintyä ryhmänjohtajittaista subjektiivisuutta. Erityisesti tämä mahdollisuus on pidettävä mielessä, jos

kartan kuviorajat enemmälti yhtyvät inventointialueiden tai piirimetsälautakuntien alueiden rajoihin. Kuviorajojen sulautuminen pitäjäryhmien Suomussalmi, Taivalkoski ja Pudasjärvi sekä toisaalta Kuusamo, Posio ja Ranua väliseen rajaan voi osittain johtua ryhmänjohtajien erilaisesta vajaatuottoisuuskäsitteen tulkinnasta.

Maan eteläpuoliskossa on puustoisia vajaatuottoisia metsiköitä 14 % metsämaan alasta. Päijänteeltä itään, Puumalaan ja Juvalle ulottuvalla alueella samoinkuin Juukasta alkavalla, Pohjois-Karjalan länsiosien kautta Savonlinnaan ja sieltä itärajalle yltävällä vyöhykkeellä näiden metsiköiden osuus sadannesluokkana on 25, viimeksi mainitulla alueella paikoin jopa 35. Muualla eteläpuoliskossa kuviot, joilla kehitysluokkaan 8 kuuluvia metsiköitä on yli 20 %, ovat melko pienialaisia. Kartta 8 kuvaa lehtipuuston osuutta metsämaan kuutiomäärästä. Verrattaessa keskenään karttoja 3 ja 8 todetaan, että eteläpuoliskossa vajaatuottoisten metsiköiden suhteellinen runsaus yleensä myös osoittaa lehtipuuston suhteellista runsautta. Havaittu riippuvuussuhde on odotettu, koska inventoinnissa hieskoivikot ja lepiköt on lähes poikkeuksetta luokiteltu vajaatuottoisiksi metsiköiksi.

Suhteellisen vähän on vajaatuottoisia metsiköitä alueella, jonka muodostavat Keski-Suomi välittömine ympäristöineen ja Keski-Suomesta Naantaliin ja Karkkilaan ulottuva kapeahko vyöhyke. Mainitun aluekokonaisuuden sisällä on yleisin kartassa esiintyvä sadannesluokka 5. Suurehkoja vastaavan sadannesluokan kuvioita on eteläpuoliskossa vielä Ilomantsin- Pielisjärven alueella ja Pohjois-Savon pohjoisosassa. Kartoissa 2 ja 3 esitettyjä sadanneksia vertaamalla todetaan, että puustoisia, vajaatuottoisia metsiköitä on yleensä vähän alueilla, missä aukeita aloja ja taimisto- ja riukuvaiheen metsiköitä on runsaasti.

Maan pohjoispuoliskossa on vajaatuottoisten metsiköiden osuus 16 % metsämaan alasta. Tälläkin sadannesluokat 25—45 osoittavat alueita, joilla kehitysluokkaan 8 kuuluvia metsiköitä on keskimäärää enemmän. Laajin näin suuria sadanneksia sisältävä aluekokonaisuus on länsi-Lapista, ilmakuva-alueen eteläpuolelta Pelkosenniemen kautta Sallaan ja sieltä edelleen Kuusamoon yltävä kuvioryhmä. Muita vastaavia keskittymiä ovat Perämeren rannikko sekä Kainuun ja Pohjois-Pohjanmaan lautakuntien alueiden koillisosat. Lehtipuuston runsaus ja metsiköiden vajaatuottoisuus eivät pohjoispuoliskossa ole yhtä selvässä riippuvuussuhteessa kuin eteläpuoliskossa. Pohjoispuoliskossa metsiköiden yli-ikäisyys ja parhaiten männyn kasvuun soveltuvilta mailta tavattavat kuusikot ovat vajaatuottoisuuden syinä täysin rinnastettavissa heikkolaatuisen lehtipuuston esiintymiseen.

Keskimäärää vähemmän on vajaatuottoisia metsiköitä alueilla, joilla tällaisten metsiköiden osuutta kuvaava sadannesluokka on 5. Maan pohjoispuoliskosta on osoitettavissa kaksi suurehkoa karttakuviota, joilla kehi-

tysluokkaan 8 kuuluvia metsiköitä on näin vähän. Toinen näistä ulottuu Pohjois-Savon pohjoisosasta kauas Pohjois-Pohjanmaalle ja Kainuuseen ja toinen Pellon ja Kolarin rajaseudulta Rovaniemen maalaiskunnan pohjoisosaan ja Sodankylän eteläosaan.

423. Puustokartat

4231. Keskikuutiokartat

Keskikuutiokarttoja ovat kartat 4 ja 5. Nämä keskikuutiokuvaukset on tehty 10 m^3 luokkaväliä käyttäen.

Kartta 4 esittää metsämaan keskikuutiota. Taulukosta 5 saatavista keskikuution keskivirheistä johdetut, pienimpien karttaan piirrettyjen kuvioiden vastaavat keskimääräiset keskivirheet ovat suuruusluokaltaan 5—10 m^3. Suurimmillaan ne ovat ruotsinkielisten rannikkolautakuntien alueilla.

Maan eteläpuoliskossa metsämaan keskikuutio on 90 m^3 ja pohjoispuoliskossa 54 m^3. Piirimetsälautakunnittaiset keskikuutiot ovat nähtävissä taulukosta 2. Karttakuvioittaiset keskikuutioluokat maan eteläpuoliskossa vaihtelevat välillä 35—135 m^3. Maksimiarvot esiintyvät pienillä kuvioilla Suomenlahden rannikolla ja minimiarvo Rautavaaran pohjoisosassa. Linjan Turku—Tampere—Jyväskylä—Joensuu etelä- ja itäpuolella keskikuutio on lähes koko alueella suurempi kuin 100 m^3. Vastaaviin keskikuutioihin ylletään myös Vaasan ympäristössä. Kun etäännytään näiltä runsaspuustoisilta alueilta, keskikuutio vähenee systemaattisesti. Ilmakuva-alueen pohjoisosissa on metsämaata niin vähän, että keskikuution kuvaamista sillä alueella ei ole pidetty perusteltuna. Kartalle kuvioidulla alueella kuutiomääräluokkien äärirajat maan pohjoispuoliskossa ovat 25 ja 105. Maksimiarvo tavataan Kuhmon itäosista kapealta valtakunnan rajaa sivuavalta vyöhykkeeltä ja minimiarvo pienehköltä kuviolta Korvatunturin ympäristöstä. Lapin, Koillis-Suomen ja Pohjois-Pohjanmaan piirimetsälautakuntien alueilla keskikuution pääasiallisin vaihteluväli on 30—70 m^3 ja Kainuussa 50—80 m^3.

III inventoinnin aineistoa käyttäen on luotu kasvullisen metsämaan keskikuutiota kuvaava kartta (Ilvessalo 1960, kartta 27). Kasvullinen metsämaa ja V inventoinnin metsämaa ovat maaluokkakäsitteinä niin läheisiä (vrt. Kuusela 1970, s. 7), että vastaavien karttojen vertailu on mielekästä. Pääpiirteet kyseisillä kartoilla ovat luonnollisesti samat. Selvimpinä eroina mainittakoon keskikuution lasku Pohjois-Karjalan itäosissa, Keski-Suomen ja Pohjois-Savon pohjoisosissa ja Kainuussa.

Kartta 5 kuvaa keskikuutiota, joka on saatu jakamalla metsämaan kokonaiskuutio maa- ja vesi-

pinta-alojen summalla. Erityisesti maan eteläpuoliskossa kartan voidaan katsoa esittävän kokonaispinta-alalla punnittua puustoisuusindeksiä. Pohjoispuoliskossa mainittu indeksitulkinta ei ole yhtä ilmeinen, koska kartan luvuissa ei ole otettu huomioon kitumaan puustoa, jonka osuus kokonaispuustosta maan pohjoispuoliskossa on kaikkiaan 8 % (Kuusela 1972, s. 35). Kartassa 5 kuvatuilla tuloksilla voisi ajatella olevan käyttöä lähinnä kuljetusten optimoinnissa.

Kartan kuvioiden muotoutumiseen vaikuttavat metsämaasadanneksen, metsämaan keskikuution ja vesipinta-alaosuuden systemaattiset muutokset tarkasteltavalla alueella. Niinpä useat suuret järvet ovat kartan kuutioluvuista paikallistettavissa. Kuviokohtaisia keskivirheitä voidaan johtaa taulukossa 5 esitetyistä kokonaiskuution keskivirheistä. Pienimmillä karttaan piirretyillä kuvioilla tarkasteltavan tunnuksen keskimääräiset keskivirheet vaihtelevat välillä 6—16 %.

Kartan korkeimmat keskikuutioluokat ovat maan eteläpuoliskossa 85 ja pohjoispuoliskossa 55. Edellinen arvo tavataan pitäjäkolmikon Lammi—Padasjoki—Luopioinen ympäristöstä sekä Mäntyharjun—Suomenniemen raja-alueelta. Pohjoispuoliskon huippuarvoon on ylletty suhteellisen laajoilla alueilla Kainuussa ja, ehkä hieman yllättäen, pienehköllä kuviolla ilmakuva-alueella.

4232. Puulajien osuudet metsämaan kuutiomäärästä

Kartat 6—8 esittävät männyn, kuusen ja lehtipuiden osuutta metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä. Käytetty luokkaväli on 10 %. Kullakin kartalla kuvioiden muodostus on tapahtunut täysin itsenäisesti. Tästä syystä tietystä pisteestä luettujen osuusluokkien summa ei välttämättä yhdy arvoon 100. Poikkeamien esiintymismahdollisuutta lisää vielä sovellettu luokitus.

Karttojen vertailun taustaksi on taulukkoon 6 merkitty puulajeittaiset sadannesosuudet metsämaan kuutiomäärästä maan etelä- ja pohjoispuolis-

Taulukko 6. Puulajien osuudet metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä maan etelä- ja pohjoispuoliskossa.

Table 6. Distribution by tree species of the overbark volume on forest land in the southern and northern half of the country.

Alue — *District*	Mänty *Pine*	Kuusi *Spruce*	Lehtipuut *Hard woods*	Yhteensä Total
	% kuutiomäärästä — % *of volume*			
Eteläpuolisko — *Southern half*	39	42	19	100
Pohjoispuolisko — *Northern half*	54	28	18	100

kossa. Sovittakoon lisäksi, että jos ei muuta ole mainittu, niin seuraavassa puulajeittaisessa tarkastelussa runsaussuhteiden vertailupohjana on aina metsämaan kuorellinen kuutiomäärä.

Maan eteläpuoliskossa männyn maksimiarvo tavataan Karvian ja Alavuden väliseltä vyöhykkeeltä. Täällä männyn sadannesluokaksi on saatu 75. Tämä kuvio ympäristöineen ja yli Saimaan lounaasta koilliseen kulkeva vyöhyke ovat eteläpuoliskossa männyn hallitsemia alueita. Mainitut kuvioryhmät ovat samalla esimerkkejä alueista, joilla kuusta esiintyy suhteellisen vähän. Vastaavasti suuri kuusen osuus ilmentää männyn niukkuutta. Runsaimmillaan on kuusi Hollolan ympäristössä, jossa sen osuus kohoaa 75 %:iin. Varsinaiseksi kuusen valta-alueeksi voidaan kutsua aluekokonaisuutta, johon kuuluvat Suomenlahden rannikko itärajalta Kirkkonummelle, Uudenmaan—Hämeen piirimetsälautakunnan alue, valtaosin Pohjois-Häme sekä Keski-Suomen eteläosat. Muita kuusikeskittymiä ovat Pohjanlahden rannikko Porista Kokkolaan, laajat alueet Pohjois-Savoa sekä Heinäveden ympäristö.

Myöhään jatkunut kaskeaminen maan itäosissa selittää lehtipuuston runsauden näillä alueilla. Suurimmillaan on lehtipuiden osuus Hartolan ja Mäntyharjun ympäristössä, jossa se sadannesluokkana ilmaisten on 45. Kaskialueen ohella eteläpuoliskon lehtipuustoalueina voidaan pitää Vaasan ympäristöä ja Keski-Suomen pohjoisosista Suonenjoelle yltävää kuvioryhmää. Mainituilla alueilla lehtipuuston osuus on yleensä yli 20 %.

Mänty on maan pohjoispuoliskon yleisin puulaji. Laajoilla alueilla männyn osuus kuutiomäärästä on yli 50 % — jopa yli 70 %. Kuusikeskittymiä pohjoispuoliskossa ovat Perämeren pohjukasta alkava Lapin kolmio ja Sallasta itärajan pintaa Kuusamoon ja sieltä Kainuun keskiosia myöten Sotkamoon jatkuva vyöhyke. Sisältyypä viimeksi mainittuun aluekokonaisuuteen kuvio, jolla kuusta on yli 60 % kuutiomäärästä. Vielä voidaan kuusikeskittymiin lukea pienehkö alue Kittilän ja Sodankylän rajaseudulla. Kuusen sadannesluokat tämän alueen kuvioilla ovat 45 ja 55.

Lehtipuiden maksimiosuus kuutiomäärästä maan pohjoispuoliskossa on 35 %. Lehtipuualueiksi voidaan lukea Perämeren rannikkoalue sekä lähes koko länsi-Lappi. Viimeksi mainittuun alueeseen yhtyy Sallasta Pelkosenniemen kautta Sodankylään kulkeva vyöhyke.

Ilvessalo (1960, kartat 17—19) on kartoissaan esittänyt mänty-, kuusi- ja lehtipuuvaltaisten metsien osuutta kasvullisen metsämaan alasta. Näillä esityksillä on monia yhteisiä piirteitä edellä tarkasteltujen kuutiomääräosuuksia kuvaavien karttojen kanssa. Esimerkkeinä mainittakoon männyn runsaus Saimaan ympäristössä ja lounaisella rannikolla sekä männyn vähyys kapeahkolla Helsinkiä ja Lammia yhdistävällä vyöhykkeellä, kuusen valta-asema Pohjanlahden rannikolla Porista Kokkolaan ja lehtipuuston runsautta ilmentävät kuviot Päijänteen itäpuolella.

Heikinheimo (1920) on jo ennen I inventointia selvittänyt kuusikoiden esiintymistä maan pohjoispuoliskossa. Hänen esittämästään kartasta on jäljitettävissä uuden kartan kuusialueista sekä Sallasta Sotkamoon yltävä vyöhyke että Kittilän ja Sodankylän rajaseudulle sattuva kuusikuvio.

4233. Keskipohjapinta-ala ja keskiläpimitta

Kartta 9 esittää keskipohja-pinta-alaa ja kartta 10 keskiläpimittaa. Ilmakuva-alueen tietoja ei näillä kartoilla ole. Taulukkoon 3 on laskettu pohjapinta-alan ja keskiläpimitan keskivirheet Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan ja Koillis-Suomen piirimetsälautakuntien alueilta. Näistä keskivirheistä voidaan johtaa vastaavien tunnusten virhearviot pienimmille karttaan piirretyille kuvioille.

Tarkkaan määriteltynä kartta 9 esittää kuorellista keskipohjapinta-alaa metsämaalla. Kuvauksessa käytetty luokkaväli on 2 m^2. Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan ja Koillis-Suomen lautakuntien alueilla sijaitseville pikkukuvioille johdetut keskimääräiset keskipohjapinta-alan keskivirheet vaihtelevat välillä 0.8—1.0 m^2. Taulukosta 5 saadut, näiden lautakuntien alueita koskevat standardoidut keskikuution keskivirheet ovat hieman suuremmat kuin vastaavat virhearviot maan eteläpuoliskoon kuuluvien lautakuntien alueilla. Keskipohjapinta-alan virhearvioiden välillä vallinnee sama suhde. Siksi mainittujen pohjoisten lautakuntien alueilla tehdyt pohjapinta-alan virhearviot eivät koko maahan sovellettunakaan systemaattisesti aliarvioine sattuman osuutta.

Maan eteläpuoliskossa kartalta tavattavien pohjapinta-alaluokkien ääriarvot ovat 5 ja 19. Maksimilukemat on saavutettu Helsingistä itään olevalla rannikkokaistalla ja Vaasan ympäristössä ja minimiarvo vähäisellä kuviolla Rautavaaran ja Sonkajärven raja-alueella. Eteläpuoliskossa kuviot, joilla pohjapinta-ala on alle 10 m^2, ovat harvinaisia. Niitä esiintyy Ilomantsissa, Pohjois-Karjalan ja Pohjois-Savon pohjoisosien välisellä rajaseudulla, Isojoelta Virroille ulottuvalla vyöhykkeellä sekä Keski-Pohjanmaan ja Keski-Suomen raja-alueella. Runsaskuutioisilla alueilla on pienehköjä 17 m^2:n kuvioita, mutta valtaosalla eteläpuoliskoa pohjapinta-ala vaihtelee välillä 10—16 m^2.

Pohjoispuoliskossa pohjapinta-alan pääasiallisin vaihteluväli on 6—12 m^2. Suhteellisen vähäisillä alueilla pohjapinta-alaluokka on 5 tai nousee arvoihin 13—15. Viimeksi mainitut luokat ovat keskittyneet etupäässä Kainuun lautakunnan alueelle itärajan pintaan.

Kartta 10 kuvaa pohjapinta-alalla punnittua kuorellista keskiläpimittaa metsämaalla. Kuvauksessa käytetty luokkaväli on 2 cm. Pienimmille karttaan piirretyille kuvioille johdetut

keskimääräiset keskiläpimitan keskivirheet vaihtelevat kolmen edellä mainitun pohjoisen lautakunnan alueilla välillä 0.7—0.8 cm.

Eteläpuoliskossa keskiläpimitan pääasiallisin vaihteluväli on 15—21 cm. Ääriarvoluokkina kartalta tavataan 14 ja 24. Minimiarvo on saavutettu sekä Kihniön ja Alavuden välisellä vyöhykkeellä että Keski-Pohjanmaan pohjoisosissa suurehkolla Pohjois-Pohjanmaallekin jatkuvalla alueella. Maksimiarvo esiintyy vain pienellä Helsingistä itään sijaitsevalla rannikkokuviolla.

Pohjoispuoliskossa kartalta tavattavien keskiläpimittaluokkien vaihteluväli on 12—26. Alin luokka esiintyy kapealla Oulujoelta Vaalaan yltävällä vyöhykkeellä sekä pienehköllä lähinnä Pyhäjokeen kuuluvalla alueella ja maksimiarvo parilla Saariselän alueeseen kuuluvalla kuviolla. Läpimittaluokat 14—22 toistuvat tasaisesti kartan kuvioilla. Pohjoispuoliskon itäosissa keskiläpimitat ovat suurempia kuin alueen länsiosissa. Erityisesti Koilliskairassa keskiläpimitat ovat poikkeuksellisen korkeat. Maksimiarvon omaavien kuvioiden lisäksi siellä sijaitsevat ainoat pohjoispuoliskon kuviot, joilla läpimittaluokkana on 24.

43. Karttatulostukseen liittyviä näkökohtia

Karttatulostuksessa ei pohjana ole mitään hallinnollista aluejakoa, vaan kuviot karttaan muodostetaan tarkasteltavan tunnuksen suhteen »luonnollisina» alueina. Kuviot pyritään rajoittamaan niin, että tunnuksen arvio kuuluisi samaan luokkaan koko kuvion alueella. Tästä syystä luokituksella on oleellinen vaikutus kartan kuvointiin. Jos luokkavälit ovat liian pienet, joko saadaan karttaan runsaasti vähäalaisia, suureksi osaksi sattuman synnyttämiä kuvioita tai riittävään satunnaisvaihtelun tasoitukseen pystyvä lohkoryhmitys joudutaan tekemään niin suurta lohkoryhmää käyttäen, että ryhmittäiset estimaatit eivät enää esitä kyllin paikallistunutta tietoa. Toisaalta suuria luokkavälejä käytettäessä luokkien sisään mahtuu niin paljon vaihtelua, että karttojen kyky kuvata tunnusten muuttumista heikkenee huomattavasti.

Pienimmät tarkastelluille kartoille piirretyt kuviot ovat kokonaispinta-alaltaan 40 000 hehtaarin suuruisia. Näille kuvioille merkitty tunnuksen suuruusluokkaa kuvaava numeroarvo määräytyy kuitenkin 90 000—130 000 suuruiselta alueelta kerätyn otoksen perusteella. Pinta-alaeron selittää kaksiulotteisen, 3×3-lohkoryhmittelyyn pohjautuvan, liukuvan keskiarvon käyttö tietokoneella tehtävää karttaa luotaessa. Kun karttakuviot suurenevat, suhteellinen ero mainittujen pinta-alojen välillä pienenee.

Kehitysluokkakarttoja ja puulajien kuutiomääräosuuksia esittäviä karttoja lukuunottamatta on edellä karttakohtaisessa tarkastelussa mainittu

tunnusten kuviokohtaisia keskivirheitä kuvaavat suuruusluokka-arviot. Näissä kartoissa pienimmilläkin kuvioilla kunkin tunnuksen keskivirhe on selvästi pienempi kuin kyseistä tunnusta esittävässä kartassa käytetty luokkaväli.

Kuntia perusyksikkönä käyttäen on inventoinnin tuloksia ajettu aluejaoin, joissa käsittelyn pohjana olevat alueositteet ovat olleet suhteellisen pieniä. Myös näin saadut tunnusten arviot ovat esitettävissä karttamuodossa. K u u s e l a (1970, s. 32) on mainittua ajatuskulkua seuraten kuvannut hakkuusäästö- ja ylihakkuualueet maan eteläpuoliskossa V inventoinnin ajankohtana. Näitä alueita voidaan verrata liukuvaa keskiarvomenetelmää käyttäen luodusta kartasta 2 tavattaviin vastaaviin vyöhykkeisiin. Vaikka kartat ovat pääpiirteiltään samanlaiset, niin ilmeisiä erojakin on havaittavissa. Esimerkkeinä mainittakoon, että kartalla 2 pääosa Virtain kuntaa ja osittain sen välitön ympäristö liittyvät Keski-Suomen piirimetsälautakunnan aluetta peittävään ylihakkuualueeseen ja Pohjois-Karjalan keskiosista tavataan pitkähkö metsätaseen kannalta tasapainossa oleva vyöhyke, jota vertailukartassa ei ole.

5. TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa on kuvattu tietokoneohjelmisto, jota käyttäen voidaan ajaa lohkoryhmittäisiä tietoja valtakunnan metsien V inventoinnin aineistosta. Tietojen keräilyperusteet annetaan ohjelmille kussakin ajotilanteessa parametriohjauksena.

Ohjelmilla on laskettu keskivirheet inventoinnin päätuloksille. Metsämaasadanneksen ja metsämaan alan sekä metsämaan kuutiomäärien virhearviot on esitetty piirimetsälautakunnittaisen aluejaon pohjalta. Lisäksi on annettu ohje samojen tunnusten keskivirheiden suuruusluokan määräämiseen maa-alan funktiona eri piirimetsälautakuntien alueilla. Muutamien pohjoisten lautakuntien alueille on laskettu esimerkin luonteisesti metsämaan keskipohjapinta-alan ja keskiläpimitan virhearviot. Sovellettu keskivirheiden laskentamenetelmä on selostettu yksityiskohtaisesti.

Toinen ohjelmiston käyttösovellutus on metsällisten tunnusten systemaattista vaihtelua kuvaavien karttojen teko. Karttojen valmistukseen tarvittava perustieto saadaan tietokoneella tulostettavilta kuvilta, joilla tarkasteltavan tunnuksen lohkoryhmittäisiä, luokiteltuja tuloksia esitetään yksinumeroisin koodein. Lohkoryhmän koodin sijainnin kuvalla määräävät lohkoryhmän koordinaatit. Tehdyt kartat kuvaavat metsämaasadannesta, kehitysluokkien osuuksia metsämaan alasta sekä metsämaan puustoa. Ahvenanmaata koskevaa tulostusta ei kartoilla ole, ja muutamien tunnusten osalta puuttuvat myös maan kolmen pohjoisimman kunnan tiedot.

KIRJALLISUUS — REFERENCES

Braun, Rudolf. 1969. Österreichische Forstinventur, Metodik der Auswertung und Standardfehler-Berechnung. Mitt. Forstl. Bundesversuchsanstalt, 84. Heft, 1969 Wien.

Cochran, W. G. 1963. Sampling Techniques. Second edition. John Wiley & Sons, Inc. New York. London. Sydney.

Heikinheimo, Olli. 1920. Pohjois-Suomen kuusimetsien esiintyminen, laajuus ja puuvarastot. Referat: Vorkommen, Umfang und Holzvorräte der Fichtenwälder in Nord-Finnland. MTJ 3.2 Helsinki.

Ilvessalo, Yrjö. 1927. Suomen metsät. Tulokset vuosina 1921—1924 suoritetusta valtakunnan metsien arvioimisesta. Summary: The forest of Suomi (Finland). Results of the general survey of the forests of the country carried out during the years 1921—1924. MTJ 11. Helsinki.

—»— 1942. Suomen metsävarat ja metsien tila. II valtakunnan metsien arviointi. Summary: The forest resources and the condition of the forests of Finland. The Second National Forest Survey. MTJ 30. Helsinki.

—»— 1956. Suomen metsät vuosista 1921—1924 vuosiin 1951—1953. Kolmeen valtakunnan metsien inventointiin perustuva tutkimus. Summary: The forests of Finland from 1921—1924 to 1951—1953. A survey based on three National Forest Inventories. MTJ 47.1. Helsinki.

—»— 1960. Suomen metsät kartakkeiden valossa. Summary: The forests of Finland in the light of maps. MTJ 52.2. Helsinki.

Janz, Klaus. 1970. Avverkningsberäkning 1969. Skogsmarksarealer, virkesförråd, möjlig avverkning m.fl. uppgifter för industriområden, län och småområden enligt riksskogstaxeringen 1964—1968. St. skogsf. inst., avd. f. skogstaxering, rapp. o upps., nr 15. Stockholm.

Koivisto, Pentti. 1965. On the systematic error in basal area caused by digression from the survey line. Seloste: Arvioimislinjan polveilun aiheuttama systemaattinen virhe pohjapinta-alassa. MTJ 60.5. Helsinki.

Kuusela, Kullervo. 1966 a. Ålands skogar 1963—1964. FF 21. Helsinki.

—»— 1966 b. A basal area-mean tree method in forest inventory. Seloste: Pohjapinta-alakeskipuumenetelmä metsäninventoinnissa. MTJ 61.2. Helsinki.

—»— 1967. Helsingin, Lounais-Suomen, Satakunnan, Uudenmaan, Hämeen ja Pohjois-Hämeen metsävarat vuosina 1966—1967. Summary: Forest resources in the Forestry Board Districts of Helsinki, Lounais-Suomi, Satakunta, Uusimaa-Häme, Pohjois-Häme and Itä-Häme in 1964—1965. FF 27. Helsinki.

—»— 1970. Suomen eteläpuoliskon metsävarat 1964—1968 ja niiden kehittyminen. Summary: Forest resources in southern half of Finland in 1964—1968 and their development. MTJ 71.1. Helsinki.

—»— 1972. Suomen metsävarat ja metsien omistus 1964—1970 sekä niiden kehittyminen 1920—1970. Summary: Forest recources and ownership in Finland 1964—1970 and their development 1920—1970. MTJ 76.5. Helsinki.

—»— & Salminen, Sakari. 1969. The 5th national forest inventory in Finland. MTJ 69.4. Helsinki.

—»— & Salovaara, Alli. 1968. Etelä-Savon, Etelä-Karjalan, Itä-Savon, Pohjois-Karjalan, Pohjois-Savon ja Keski-Suomen metsävarat vuosina 1966—1967. Summary: Forest resources in the Forestry Board Districts of Etelä-Savo, Etelä-Karjala, Itä-Savo, Pohjois-Karjala, Pohjois-Savo and Keski-Suomi in 1966—1967. FF 42. Helsinki.

—»— 1969. Etelä-Pohjanmaan, Vaasan ja Keski-Pohjanmaan metsävarat vuonna 1968. Summary: Forest resources in the Forestry Board Districts of Etelä-Pohjanmaa, Vaasa and Keski-Pohjanmaa in 1968. FF 62. Helsinki.

—»— 1971. Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan, Koillis-Suomen ja Lapin metsävarat vuosina 1969—1970. Summary: Forest recources in the Forestry Board Districts of Kainuu, Pohjois-Pohjanmaa, Koillis-Suomi and Lappi in 1969—1970. FF 110. Helsinki.

Matérn, Bertil. 1947. Metoder att uppskatta noggrannheten vid linje- och provytetaxering. Medd. fr. St. skogsf. inst. 36.1. Stockholm.

—»— 1960. Spatial variation. Stochastic models and their applications to some problems in forest surveys and other sampling investigations. Medd. fr. St. skogsf. inst. 49.5. Stockholm.

—»— 1963. Estimating the standard error in stratified sampling with systematic sampling inside strata. Stencil. Stockholm.

Nyyssönen, Aarne, Kilkki, Pekka & Mikkola, Erkki. 1967. On the precision of some methods of forest inventory. Seloste: Eräiden metsänarvioimismenetelmien tarkkuudesta. Acta Forestalia Fennica 81.4. Helsinki.

Ohlsson, Stig. 1972. Förstudier för utforming av nytt samplingssystem. Skogshögskolan. Inst. för skogstaxering. Riksskogstexeringen. Mål och metod. Bilaga 3. Stencil.

Pirkka-Hämeen yksityismetsät. 1968. Pirkka-Hämeen piirimetsälautakunnan alueen yksityismetsien kehitys 1953—1965 sekä tulevan käytön ja hoidon suuntaviivoja. Hämeen Metsänhoitajat ry. Orivesi.

Poso, Simo & Kujala, Matti. 1971. Ryhmitetty ilmakuva- ja maastotulkinta Inarin, Utsjoen ja Enontekiön metsien inventoinnissa. Summary: A two-phase forest inventory method based on photo and field plot samplings as applied in northernmost Lapland. FF 132. Helsinki.

Suositus ruutujärjestelmän käyttämisestä biologian eri aloilla havaintopaikkojen ilmoittamisessa. 1970. Ruutujärjestelmätoimikunta. Silva Fennica. Vol. 4, 1970 N:o 3: 130—131. Helsinki.

Takseringsresultater fra 12 fylker 1964—1967. 1970. Taksering av Norges skoger: 17—136. Utgitt av Landskogtakseringen. Oslo.

Lyhenteet — Abbreviations
FF = Folia Forestalia
MTJ = Metsäntutkimuslaitoksen Julkaisuja

KARTTALUETTELO

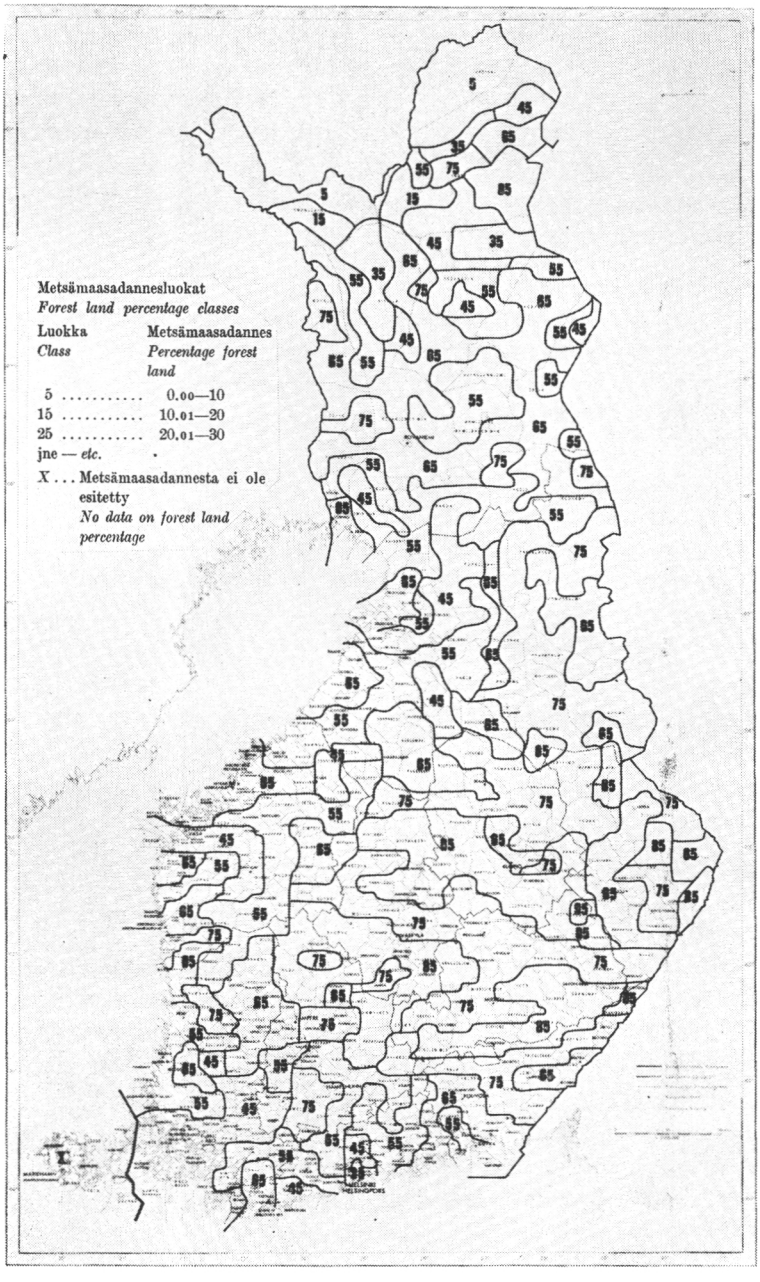
Sivu

1. Metsämaasadannes kokonaismaa-alasta 52
2. Aukean alan, siemenpuumetsiköiden sekä taimisto- ja riukuvaiheen metsiköiden yhteinen osuus metsämaan alasta 53
3. Puustoisten vajaatuottoisten metsiköiden osuus metsämaan alasta 54
4. Metsämaan kuorellinen keskikuutio 55
5. Keskikuutio, joka on saatu jakamalla metsämaan kuorellinen kokonaiskuutio maa- ja vesipinta-alojen summalla 56
6. Männyn osuus metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä 57
7. Kuusen osuus metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä 58
8. Lehtipuiden osuus metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä 59
9. Kuorellinen keskipohjapinta-ala metsämaalla 60
10. Pohjapinta-alalla punnittu kuorellinen keskiläpimitta metsämaalla 61

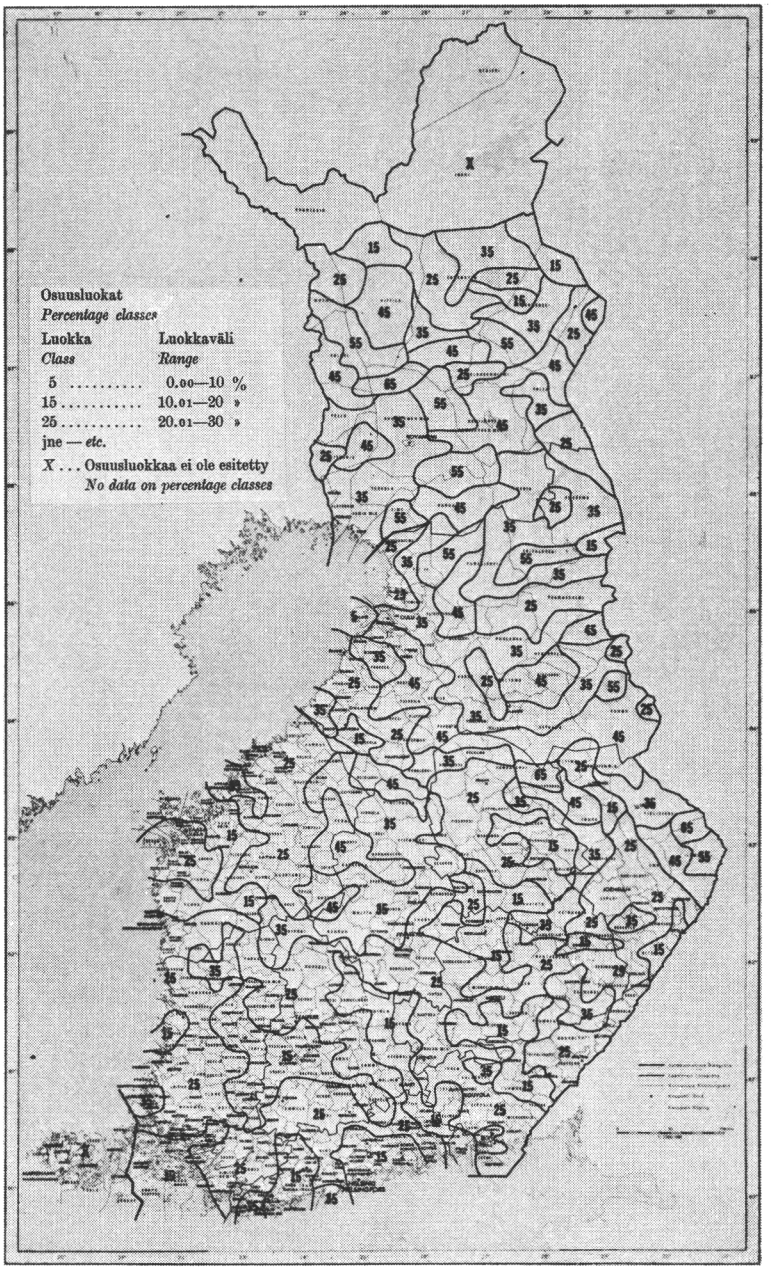
LIST OF MAPS

Page

1. Percentage forest land in the total land area 52
2. Clumped percentage regeneration areas, seed tree, seedling and sapling stands in the forest land area 53
3. Percentage stocked low-yielding stands in the forest land area 54
4. Overbark mean volume on forest land 55
5. Mean volume obtained by dividing the total overbark volume of the forest land by the sum of land and water areas 56
6. Percentage pine in the overbark volume on forest land 57
7. Percentage spruce in the overbark volume on forest land 58
8. Percentage hardwoods in the overbark volume on forest land 59
9. Overbark mean basal area on forest land 60
10. Overbark mean diameter as weighted by the basal area on forest land 61

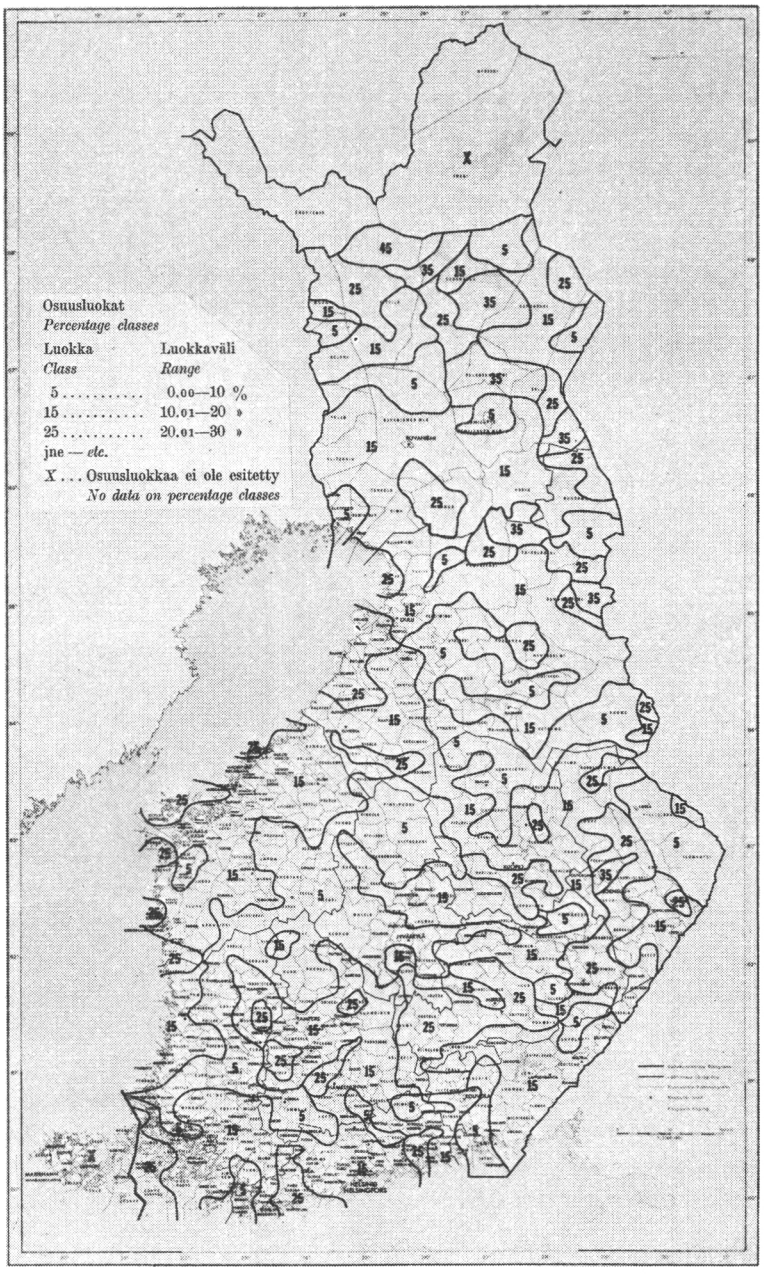


Kartta 1. Metsämaasadannes kokonaismaa-alasta.
Map 1. Percentage forest land in the total land area.

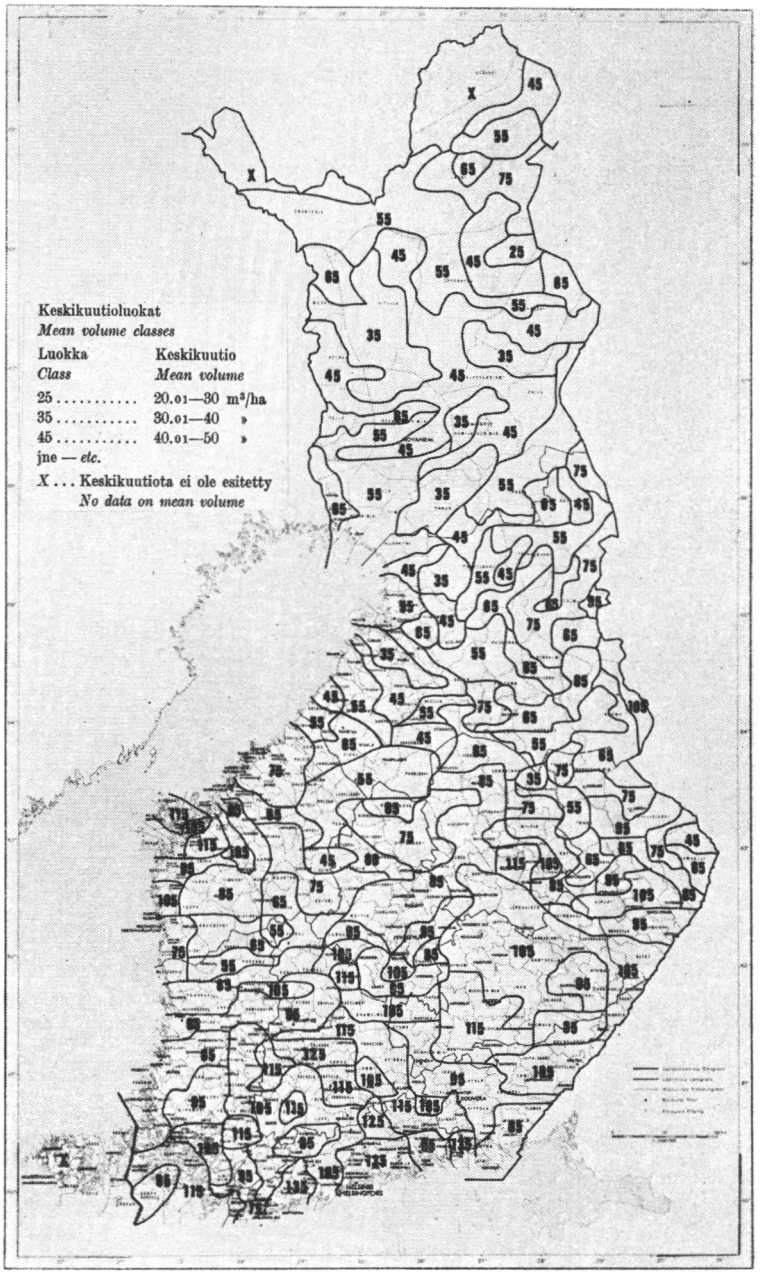


Kartta 2. Aukean alan, siemenpuumetsiköiden sekä taimisto- ja riukuvaiheen metsiköiden yhteinen osuus metsämaan alasta.

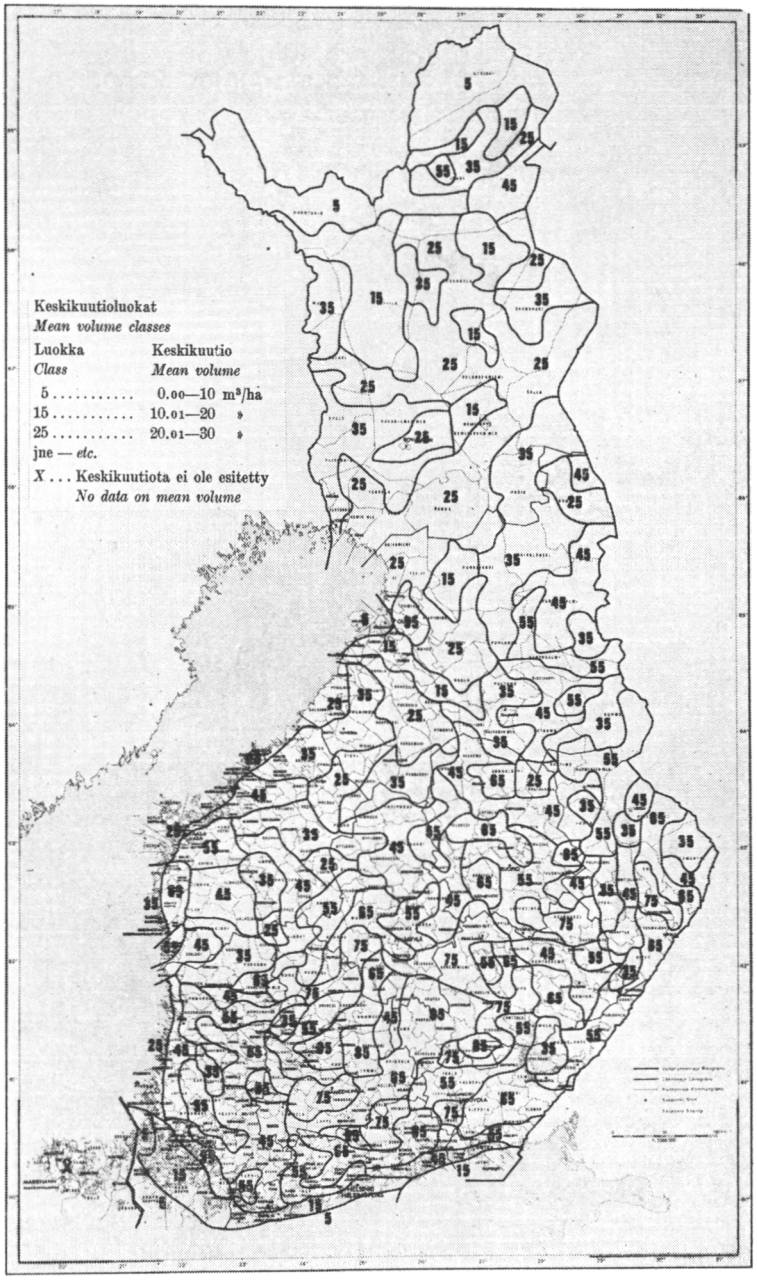
Map 2. Clumped percentage regeneration areas, seed tree, seedling and sapling stands in the forest land area.



Kartta 3. Puustoisten vajaatuottoisten metsiköiden osuus metsämaan alasta.
Map 3. Percentage stocked low-yielding stands in the forest land area.

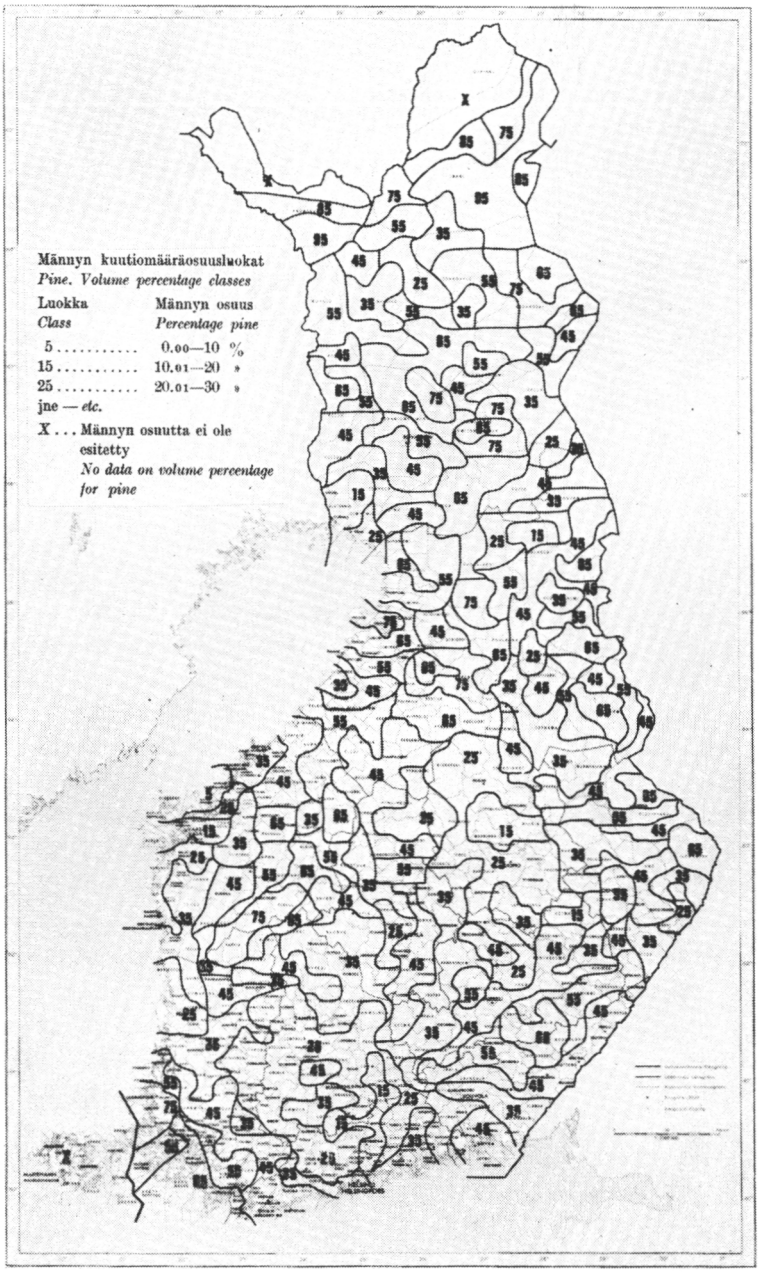


Kartta 4. Metsämaan kuorellinen keskikuutio.
Map 4. Overbark mean volume on forest land.

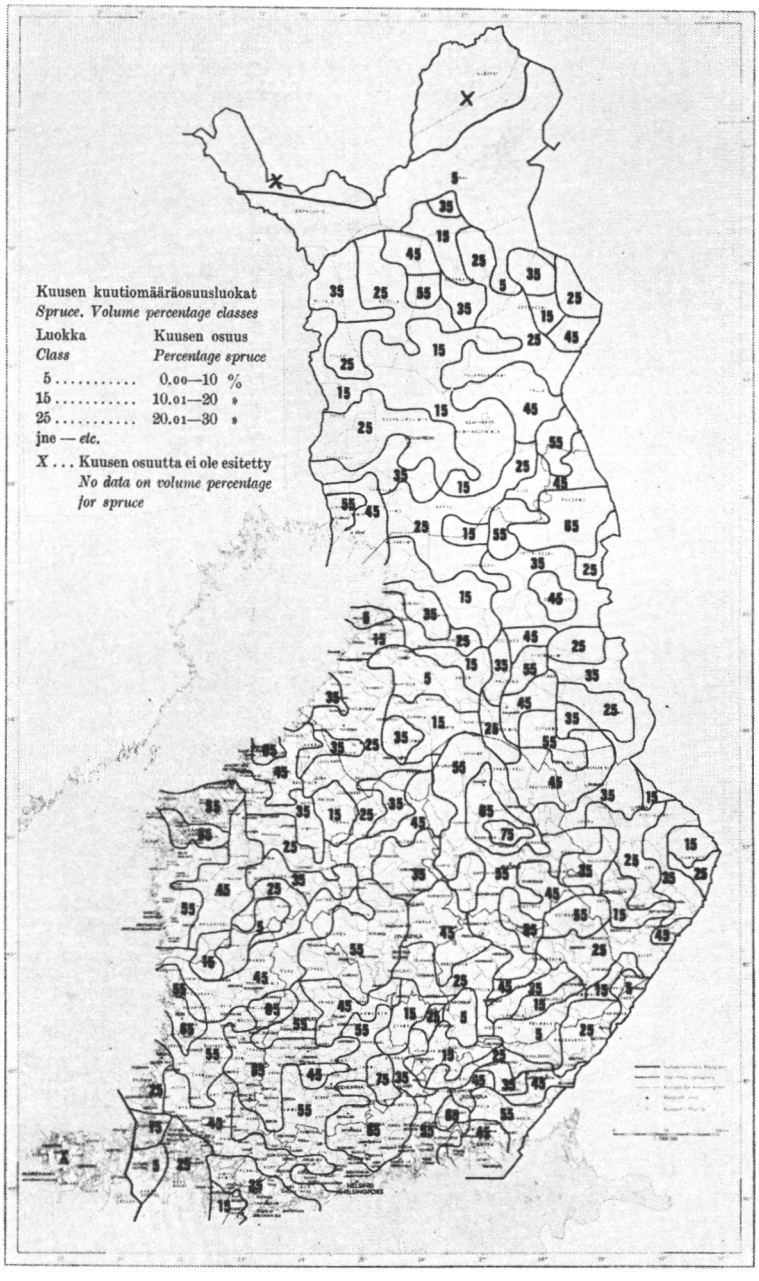


Kartta 5. Keskikuutio, joka on saatu jakamalla metsämaan kuorellinen kokonaiskuutio maa- ja vesipinta-alojen summalla.

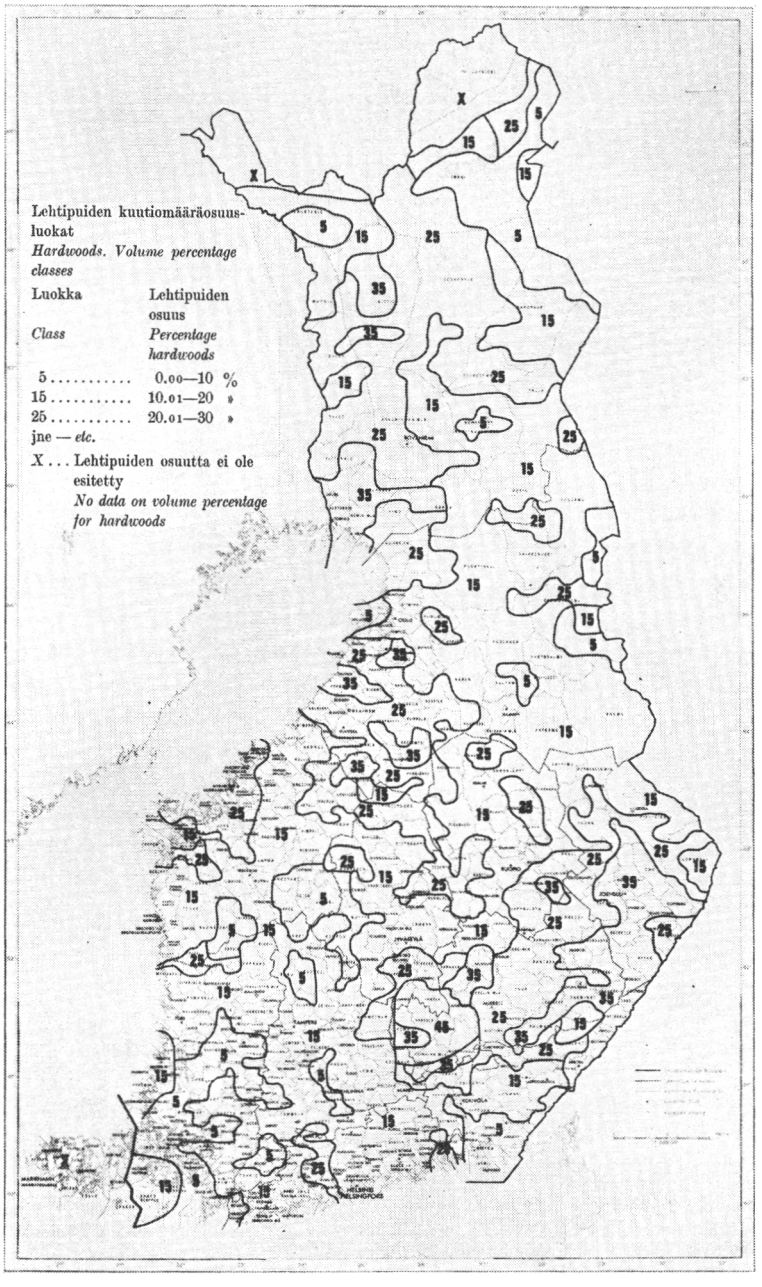
Map 5. Mean volume obtained by dividing the total overbark volume of the forest land by the sum of land and water areas.



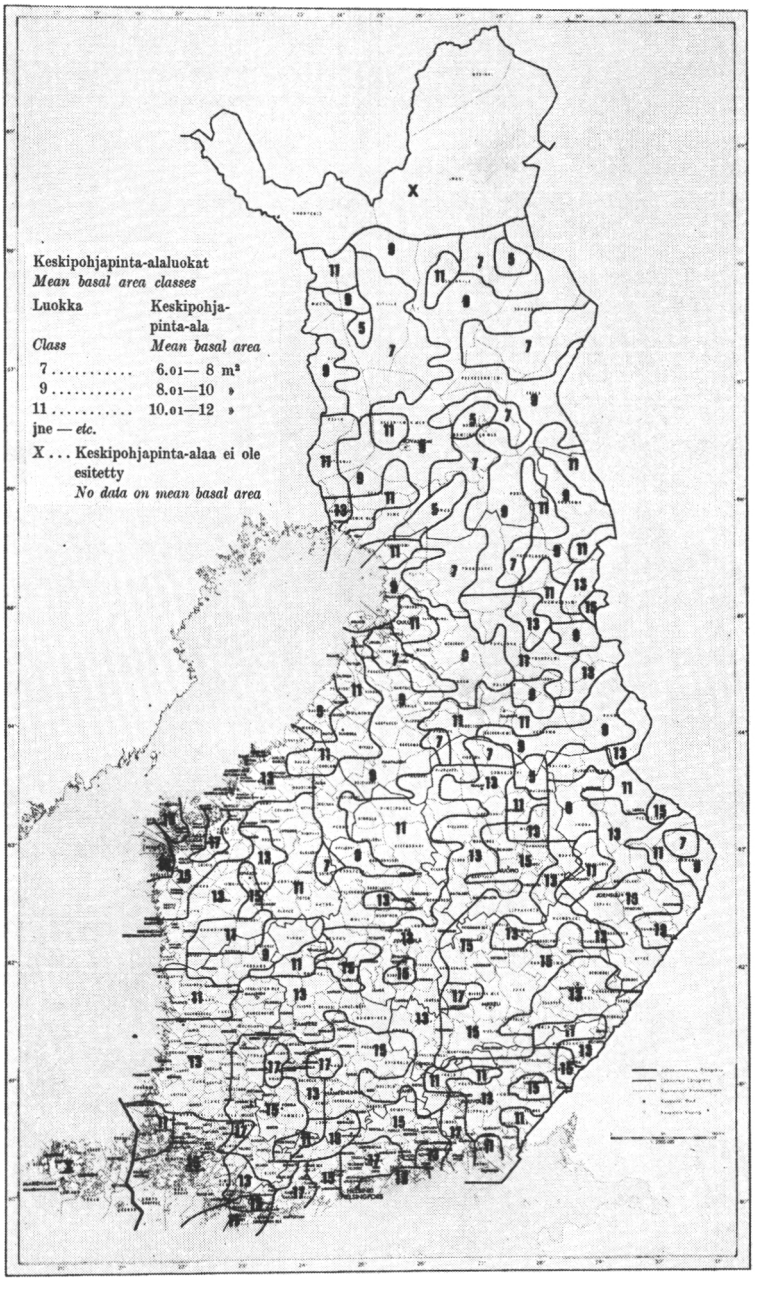
Kartta 6. Männyn osuus metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä.
Map 6. Percentage pine in the overbark volume on forest land.



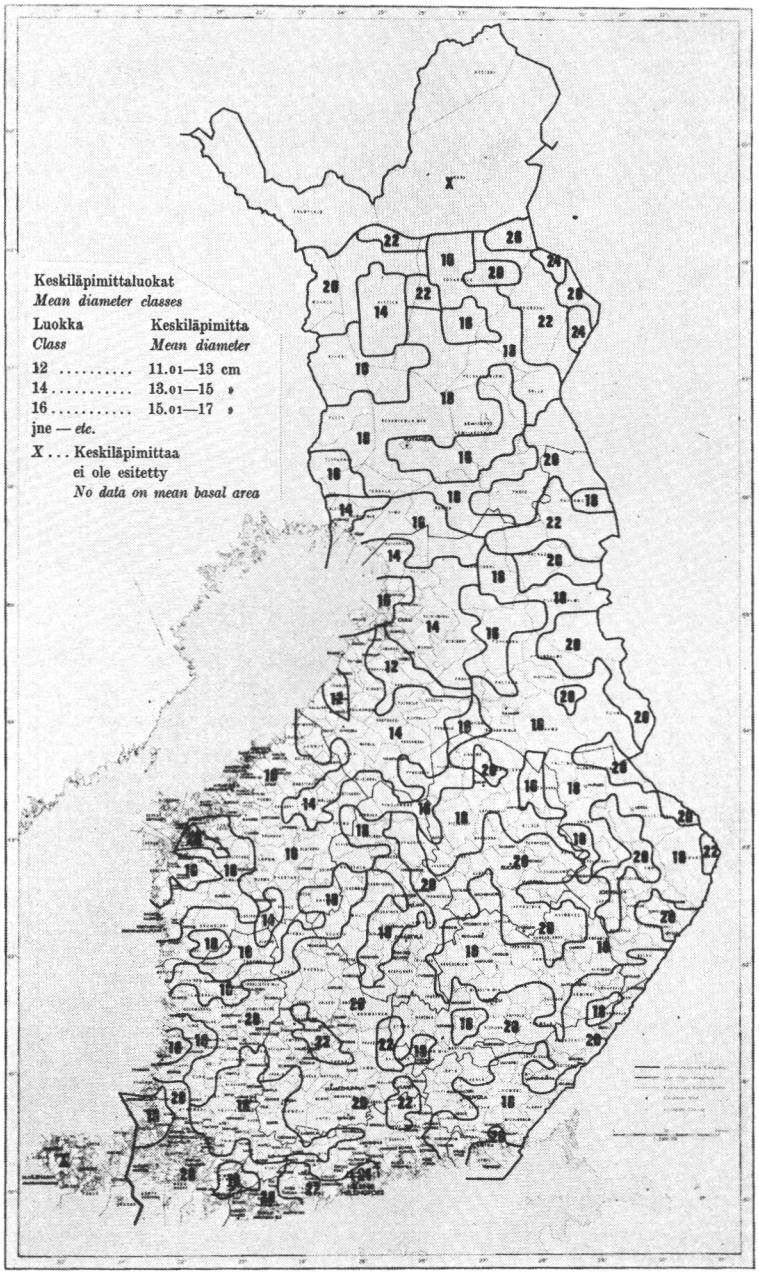
Kartta 7. Kuusen osuus metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä.
Map 7. Percentage spruce in the overbark volume on forest land.



Kartta 8. Lehtipuiden osuus metsämaan kuorellisesta kuutiomäärästä.
Map 8. Percentage hardwoods in the overbark volume on forest land.



Kartta 9. Kuorellinen keskipohjapinta-ala metsämaalla.
Map 9. Overbark mean basal area on forest land.



Kartta 10. Pohjapinta-alalla punnittu kuorellinen keskiläpimitta metsämaalla.
Map 10. Overbark mean diameter as weighted by the basal area on forest land.

SUMMARY

Reliability of the results from the fifth national forest inventory and a presentation of an output-mapping technique

1. Background and aim of the study

Two aims were set up for the study: to give an idea of the reliability of the results of the Fifth National Forest Inventory and to describe the systematic variation in forest characteristics by means of maps.

For this purpose, a set of computer programs was created to carry out calculations of the results by tract groups. Working out the programs and most of the calculations performed were common work phases in the efforts to reach the two goals set up for the study.

The Fifth National Forest Inventory in Finland was carried out during the years 1963—70. The inventory areas presented in Fig. 1 show the layout of the project. Data was collected by tract inventory areas using systematic sampling. The numbers of sampling units — tracts — in each tract inventory area are presented in the text table on p. 7. The tracts were numbered by inventory area as points in a two-dimensional coordinate system. For a more detailed description of the tract inventory, see K u u s e l a and S a l m i n e n (1969). A description of the method employed in the air photograph area has been presented by P o s o and K u j a l a (1971). Up to now calculation of the results has mainly been carried out by administrative regions (K u u s e l a 1970, 1972).

2. The computer programs

It was not possible to calculate the results for tract groups by the use of the programs created for calculation of regional data, but this required a separate program. Fig. 2 shows the running scheme of the programs used, including both the programs worked out and the data sets concerned. With regard to their principles of functioning, the programs were given a general character. Detailed working instructions were given using p a r a m e t e r c a r d s.

The program LOHKOT was used for calculation of the results by tracts. The t r a c t r e c o r d s thus obtained were identified by means of the tract code and the commune code. Using the communes as basis it was possible to form calculation areas which were given their own region codes. Substituting the commune codes with region codes was carried out using the program KUNNAT. The library program SORT was used to arrange the data set obtained with the KUNNAT program into a rising order according to the region and tract codes.

Grouping the tract records into t r a c t g r o u p r e c o r d s was performed using the RUUTU program. This grouping was based on the fact that the tract numbers

could be interpreted as being points in a two-dimensional coordinate system. The information required for the use of the program consists of the basic point of grouping, the area to be treated and the rectangle covering this area. Starting from the basic point, a regular tract group index point system was formed within the rectangle from the tract numbers. The density of this system was regulated using parameter cards. Around each tract group index point a tract group was formed the shape and size of which were decided on in accordance with the actual situation. The tract group output was presented in the form of a tract group record the tract number of which was represented by the group index point. Figs. 3, 4 and 7 offer examples of the method of grouping described.

When a tract group data set is fed into the computer for presentation of the output in the form of maps, the tract group record offers information concerning the tracts belonging to the tract group in question only in the form of sums. In the case of the data used in computation of the mean errors, on the other hand, the question is about symmetrical differences within the tract groups.

3. Reliability of the results of the inventory

The mathematical basis of and the model applied in computing the mean errors for the tract inventory groups have been described by Matérn (1960). The tract groups presented in Figs. 3 and 4, which have been used in calculation of the mean errors, offer examples of the systematical covering of the calculation areas formed by tract groups.

The mean errors were calculated by Forestry Board Districts (Fig. 5), and the results obtained are presented in Tables 1—3. Table 5 was compiled from mean errors which had been standardized with regard to the land area. Fig. 6 shows the mean errors of the total volume as a function of the land area in the light of examples formed by two Forestry Board Districts. The figures were derived from the data presented in Table 5.

Table 4 shows a comparison between the mean errors derived from the tract inventory areas in two different ways. On one hand, the mean errors were calculated from a material collected directly from the inventory area, considering the inventory area as being the basic area of calculation. On the other hand, the inventory area was considered as being a pooled area formed by the Forestry Board District areas. In this case the mean errors were obtained for strata using the formulae for stratified sampling. They were derived from the mean errors calculated by Forestry Board Districts.

4. Maps

In compilation of the maps separate maps were first worked out for each inventory area, and these were then united so as to cover the whole country. In describing the working phases of the map preparation the same order was adapted: the maps concerning separate inventory areas are discussed first and then those for the whole country.

The maps of the inventory areas were prepared using the program KARTTA (Fig. 2) and the tract group data set I. The data set contains a tract group record for each tract covered by the inventory area concerned, and consequently, the tract group concerned has been attached to each tract number. Fig. 7 shows the tract group alternatives used in preparation of the maps.

The proportions between the summed data by tract groups for different characteristics are examined in the map output. As examples, let us mention the forest land percentage and the mean volume on forest land. The calculated ratio estimates are not put out as such, but they are classified and converted into a form of code with only one character. The codes by tract groups are stored in the main storage according to their tract group index number. After calculation of the codes for all the tract groups an encoded map is listed.

Fig. 8 shows an example of the computer map output. The figure presents the systematic variation in the forest land percentage as obtained for the tract inventory area III. The maps can be considered as presenting the estimate under examination as a t w o - d i m e n s i o n a l m o v i n g a v e r a g e. In tract inventory area III the distance between the tracts was 9 km. Thus, when based on 3×3 tract groups, the map presents the forest land percentage for quadrate areas the sides of which have a length of 27 km. In the map presented in our figure, which was based on 3×3 tract grouping, the areas are indicated within which the forest land percentage was considered as belonging to the same code class. This would have been much more difficult if estimates based on 2×2 tract grouping had been used. The effect of levelling of 3×3 tract grouping can be seen from the frequency distributions shown in the figure. 3×3 tract grouping seemed to eliminate random variation so efficiently that all the maps were prepared on the basis of this grouping.

The scale of the maps presented in Fig. 8 is not the same in their longitudinal as in their latitudinal direction. Output was carried out within the frame of the possibilities offered by the line printer used. With the aid of a simple square network of the kind presented in Fig. 9, the map prepared by the computer was fitted exactly to the scale 1 : 2 000 000. The outlined map figures presented in Fig. 8 b were transferred into the square system, and in each map figure thus obtained, the midpoint of the forest land percentage class characteristic of it was indicated by the corresponding numerical figure.

The maps worked out into the same scale by inventory areas were combined so as to cover the whole country. They were photographed together with a map in which the borders and the names of the communes were shown. This made it easier to relocate the map figures. The map presented in our example in the foregoing is, in its final shape, a part of that showing the distribution of the forest land percentage in the whole country (Map 1).

In preparing the maps, even the small- range variation occurring was taken into consideration. If the same code value was obtained for a tract group cluster consisting of at least six tract groups, a separate map figure was drawn for it. Thus, the smallest map figures which were separated were based on the results obtained from 15 to 20 tracts. The range of the random variation which occurs in connection with small map figures has been estimated for some characteristics from the mean errors in Table 5 on the basis of the numbers of tracts. In the case of the forest land percentage, the variation — expressed in terms of relative mean error — was 3—12 %, whereas the corresponding absolute mean error obtained for the mean volume (Map 4) was 5—10 m^3.

MÄNNYN TAIMIEN KUNTO JA JUURISTON RAKENNE POHJOIS-SUOMESSA

ERKKI LÄHDE JA SEPPO SILTANEN

SUMMARY

THE STRUCTURE OF THE ROOT SYSTEM AND THE CONDITION OF THE PINE *(PINUS SILVESTRIS L.)* SEEDLINGS IN NORTHERN FINLAND

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0069-2
Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Metsäntutkimuslaitoksen metsänviljelyn tutkijaryhmän työohjelmaan kuuluvana. Työn suunnittelusta ja aineiston käsittelystä ovat tekijät vastanneet yhteisvoimin. L ä h d e on viimeistellyt työn julkaisukuntoon ja S i l t a n e n on huolehtinut aineiston keräyksestä maastossa.

Arvokasta apua työn eri vaiheissa ovat tekijät saaneet mm. seuraavilta henkilöiltä: lis. Pertti H a r i l t a, prof. Risto S a r v a k s e l t a, metsänhoitaja Markku S i i t o s e l t a ja prof. Paavo Y l i - V a k k u r i l t a. Professori Yli-Vakkuri on lukenut käsikirjoituksen siinä vaiheessa, kun se on esitetty metsänhoitotieteen laudaturtyönä. Prof. Sarvas ja vt. prof. Veikko H i n t i k k a ovat lukeneet julkaisemista varten laaditun käsikirjoituksen.

Työ on tehty suureksi osaksi Veitsiluoto Osakeyhtiön v. 1971 Rovaniemen tutkimusasemalle myöntämän lahjoituksen turvin, josta tekijät haluavat näin tutkimusaseman puolesta lausua parhaat kiitokset.

Tässä yhteydessä haluamme esittää kiitoksemme tutkimusaseman henkilökunnalle, erityisesti metsäteknikko Tapani Pohjolalle ja kaikille edellä mainituille sekä myös muille työn edistymiseen myönteisesti vaikuttaneille henkilöille.

Rovaniemellä heinäkuussa 1972

Erkki Lähde *Seppo Siltanen*

SISÄLLYSLUETTELO

	Sivu
Alkusanat	3
1. Johdanto	5
2. Tutkimusaineisto ja -menetelmä	8
21. Koealojen ja koetaimien valinta	8
22. Taimien verson ja juuriston luokitus ja mittaus	8
23. Kasvupaikan luokitus ja mittaus	10
3. Tutkimustulokset	12
31. Taimien juuriston rakenne ja kehitys	12
32. Taimien verson kunto ja sen riippuvuus juuristosta	16
33. Taimien verson kunto ja sen riippuvuus maan ominaisuuksista	19
4. Tulosten tarkastelu	23
5. Tiivistelmä	27
Kirjallisuusluettelo	28
Summary	31

1. JOHDANTO

Puiden kyky sopeutua erilaisiin maa- ja ilmasto-olosuhteisiin on suureksi osaksi riippuvainen juuriston rakenteesta, sen ravinteiden otosta ja kasvunopeudesta sekä kyvystä kestää epäedullisia maan fysikaalisia ominaisuuksia. Wagenknecht (1955) esimerkiksi korostaa, että erityisesti olisi opittava tuntemaan juuriston kehitys huonoissa kasvuolosuhteissa, varsinkin ns. vaikeilla maaperillä. Eri puulajien ja jopa saman puulajin eri rotujen välillä on huomattaviakin eroja suhtautumisessa maan ominaisuuksiin (Leyton 1956, Ahlgren ja Hansen 1957, Leyton ja Rousseau 1957, Zak 1961, Hosner ja Leaf 1962, Lyr ja Hoffmann 1967, Crawford ja Tyler 1969).

Eräät neuvostoliittolaiset tutkijat ovat sitä mieltä, että mänty on Neuvostoliiton alueella puulaji, jonka levinneisyyttä rajoittaa maan riittämätön lämpiäminen kasvukauden aikana (Kolesnikov 1945, Orlov ja Koshelkov 1971). Mänty ulottuukin Neuvostoliitossa pohjoiselle puurajalle vain Euroopan puolella ja ikuisen jään laajalla alueella Siperiassa se jää paljon etelämmäksi kuin kuusi ja lehtikuusi. Tyrtikovin (1954) mukaan maan lämpötila on päätekijä juurien kasvun suhteen pohjoisilla metsänrajaseuduilla, samoin Aaltonen (1942) toteaa, että mänty on juurten kasvun osalta lämpöä vaativampi kuin esim. kuusi.

Mittauksia juurten kasvusta ja kasvun alkamisesta lämpötilaan verrattuna on tehty useiden tutkijoiden toimesta (esim. Roze 1937, Ladefoged 1939, Lobanov 1949, Batalov 1958, Utkin 1958, Leibundgut et al. 1963). Vomperski (1968) päätteli, että juurten kasvun alkaminen riippuu paitsi sen hetken lämpötilasta myös sitä edeltävän kasvukauden lämpösummasta.

Männyn juuriston rakennetta selvitteleviä tutkimuksia on myös tehty varsin runsaasti. Niissä on tarkasteltu juuriston rakennetta erilaisilla maalaaduilla, sen jakaantumista eri maakerroksiin ja massan osuutta maan määrästä (Kokkonen 1923, Laitakari 1927, Vostrikov 1940, Kalela 1949, Shimanjuk 1950, Heikurainen 1955, Gael et al. 1962, Bibelriether 1963, 1964, Gael ja Voronkov 1965, Schmidt — Vogt 1971 ym.). Tutkimusten perusteella on voitu todeta, että verrattain karuilla mailla, jotka ovat riittävän kosteita ja joissa tuuletus, lämpötila ja ravinnepitoisuus on riittävä, männylle muodostuu vahva vaaka-

suora juuristo sekä syvälle ulottuva pääjuuri sivujuurineen. Männylle ominainen juuriston rakenne, pää- ja sivujuuret, voi siis syntyä vain, jos olosuhteet maassa ovat juurten kehitykselle suotuisat.

Soistuneilla mailla juurten kasvua voi rajoittaa lämmön puutteen ohella myös liika vesi ja riittämätön tuuletus. Niinpä vedenvaivaamilla mailla männyn juuret eivät pysty kasvamaan maan syvempiin kerroksiin, koska ilmanvaihto niissä on riittämätön. Seurauksena on esim. turvemailla juurten maanpinnan läheisyys (Kokkonen 1923, Heikurainen 1955, Iljinski 1964, Lyr ja Hoffmann 1967, Vomperski 1968), mihin tosin kuivatus vaikuttaa syventävästi (esim. Paavilainen 1966, Lähde 1969).

Huonon tuuletuksen ja tulvan kausina pääjuuri tai jokin sivuhaara voi kasvaa voimakkaasti sivulle päin antaen kuvan taipuneesta pääjuuresta (Orlov ja Koshelkov 1971). Turvemaiden ohella myös savimailla männyn pääjuuri yleensä puuttuu tai kehittyy heikosti (Aaltonen 1920, Laitakari 1927, Ladefoged 1939, Köstler et al. 1968). Kuolan niemimaalla männyn juuristo jää pinnalliseksi myös löyhillä hiekkamailla (Orlov ja Koshelkov 1971), mikä johtunee maan alhaisesta lämpötilasta. Männyn pintajuurien kasvun on todettu alkavan, kun maan lämpötila on noussut yli 6°C:n (Vomperski 1968). Sama lämpötilavaatimus pätee myös syvemmille juurille (Orlov ja Koshelkov 1971). Voimakas juurten kasvu alkaa vasta, kun maan lämpötila on n. 8—10°C (Ladefoged 1939, Lobanov 1949). *Pinus banksianan* juurten kasvu nopeutuu vasta yli 10°C:n lämpötilassa (Kaufman 1945). Barneyn (1951) mukaan *Pinus taedan* juurien kasvu on 25°C:n vakiolämpötilassa nelinkertainen verrattuna 10°C:een. Orlov ja Koshelkov (1971) eivät todenneet eroja yli 9°C:n lämpötiloissa, vaan päinvastoin voimakkain männyn juurten kasvu oli alhaisemmilla lämpötiloilla kasvun alkuvaiheessa. Syksyllä ei heidän mukaansa todeta samanlaista juurien kasvunopeuden ja maan lämpötilan välistä riippuvuussuhdetta kuin keväällä, kuitenkin lämpötila määrää juurien elintoimintojen aktiivin periodin pituuden, elleivät muut tekijät ole esteenä.

Lyrin ja Hoffmannin (1967) tutkimusten mukaan juurten kasvunopeus vaihtelee kasvukauden aikana enemmän kuin maan lämpötila. Lämpötila on ratkaiseva tekijä vain keväällä ja syksyllä, koska kesän kuluessa se toimii yhdessä muiden tekijöiden, kuten maan kosteuden ja verson aktiviteetin kanssa. Tähän ilmiöön liittyy männyn taimien juurten kasvun periodisuus, jota ovat selvitelleet useat tutkijat (esim. Rakhteyenko et al. 1962, Lähde 1966).

Pohjois-Suomessa viime vuosina tapahtuneet männyn viljelytaimistojen laaja-alaiset tuhoutumiset (Solin 1970, Valtanen 1970 a, Kuusela ja Salovaara 1971, Etholén 1971) ovat aiheuttaneet vakavaa huo-

lestuneisuutta vielä elossa olevien ja edelleen perustettavien taimistojen tulevaisuudesta. Syitä tuhoutumisiin on yritetty arvioida useiden henkilöiden toimesta. Niinpä niitä on käsitelty monissa eri kirjoituksissa (esim. Valtanen 1969, 1970 a, b, Lähde 1970, 1971, Pohtila 1970, 1972, Norokorpi 1971). Syiden joukossa on arveltu myös taimien istutustavan ja sen seurauksena juuristojen epämuodostumien vaikuttavan taimien tuhoutumiseen (esim. Valtanen 1970 b).

Tässä tutkimuksessa on tarkoituksena selvittää, poikkeavatko eri tavalla — luontaisesti tai viljellen — syntyneiden männyn taimien juuristot rakenteeltaan toisistaan ja missä määrin juuriston rakenne, verson koko ja kunto ovat riippuvaisia toisistaan ja maan hienoimpien, veden läpäisevyyteen voimakkaan heikentävästi vaikuttavien lajitteiden osuudesta, humuskerroksen paksuudesta sekä maan tiiviydestä.

2. TUTKIMUSAINEISTO JA -MENETELMÄ

21. Koealojen ja koetaimien valinta

Tutkimuksen aineisto kerättiin kesällä 1971. Tutkittaviksi valitut, keskipituudeltaan 30—150 cm:n pituiset taimistot sijaitsevat metsänviljelyn runkotutkimuksen Itä- ja Länsi-Lapin regioissa. Osa taimistoista (15 kpl) oli samoja, jotka kuuluivat metsähallinnon männyn alkuperätutkimukseen (aineisto kerätty 1969) Rovaniemen, Kittilän, Kolarin, Sodankylän, Luiron ja Yli-Kemin hoitoalueissa. Kymmenen taimistoa oli Metsäntutkimuslaitoksen Pohjois-Suomen metsänviljelyn inventointitutkimuksen koealueilta (E t h o l é n 1971). Loput viljelytaimistoista (17 kpl) ja kaikki luontaisesti syntyneet taimistot valittiin suoraan maastosta teiden varsilta tiedustelemalla paikallisilta metsäammattimiehiltä tai kuljettaessa eri puolilla tutkimusaluetta. Tutkittuja taimistoja kertyi siis yhteensä 47 kpl, joista viljelytaimistoja 42 kpl ja luontaisesti syntyneitä 5 kpl. Viljelytaimistoista oli puhtaita tai joitakin luonnontaimia sisältäviä kylvötaimistoja 14 kpl ja vastaavanlaisia istutustaimistoja 10 kpl sekä 19 kpl sellaisia, joissa oli sekä kylvö- että istutustaimia ja mahdollisesti lisäksi luonnontaimia.

Koealan paikan valinnassa meneteltiin pienissä, vain muutaman hehtaarin suuruisissa taimistoissa siten, että koealan keskipiste sijoitettiin silmävaraisesti arvioituun taimiston keskipisteeseen. Suurialaisissa taimistoissa edettiin tulosuunnasta vähintään 100 m taimiston keskustan suuntaan, johon koealan keskipiste sijoitettiin. Keskipiste merkittiin maastoon paalulla. Siitä mitattiin askelin pääilmansuuntiin 10, 20 ja 30 m:n etäisyydet. Tutkittaviksi valittiin näitä pisteitä lähinnä olevat taimet eli yhteensä 12 tainta kutakin koealaa kohti. Kylvötaimista otettiin tutkittavaksi kylvötuppaan valtataimi. Yhteensä tutkittiin siten 576 tainta, joista kylvötaimia oli 224, istutettuja 199 ja luontaisesti syntyneitä 153. Luontaisesti syntyneitä taimia tuli siis mukaan tutkimukseen myös viljelytaimistoista. Kuitenkin kaksi luonnontainta hylättiin aineiston käsittelyn yhteydessä myöhemmin kohdassa 31. esitetystä syystä.

22. Taimien verson ja juuriston luokitus ja mittaus

Taimista mitattiin verson pituus humuksen yläpinnasta vuoden 1970 kasvaimen kärkeen sekä kahden viimeisen vuoden (1969 ja 1970) yhteenlaskettu verson pituuskasvu. Mittaukset tehtiin 1 cm:n tarkkuudella. Taimen

kunto luokiteltiin seuraavasti: hyväkuntoinen, huonokuntoinen tai kuollut. Lisäksi määriteltiin taimen sijainnin ja koealatietojen perusteella sen syntytapa. Maan pinnan taso merkittiin taimen runkoon ja rungon läpimitta mitattiin 1 mm:n tarkkuudella kuoren päältä. Taimen ympärille leikattiin lapiolla maahan ura 50 cm:n etäisyyteen rungosta. Tällöin katkaistiin ne juuret, jotka ulottuivat yli 50 cm:n etäisyyteen. Tosin, koska kyse oli taimista, ulottuivat juuret vain harvoissa tapauksissa yli 50 cm:n etäisyyteen.

Juuriston mittausta varten taimi vedettiin maasta. Tätä menettelyä käytettäessä pystyttiin keräämään suurempi aineisto kuin eräänä vaihtoehtona ollutta hankalaa kaivumenetelmää käyttäen. Lisäksi taimen ylösveto soveltuu paremmin kivisille maille kuin kaivamis- tai näytteidenottomenetelmät. Taimen koko ei kovinkaan paljon vaikeuttanut sen nostamista, koska tutkittavien taimien maksimipituudeksi rajoitettiin 150 cm.

Juurten katkeilua taimia nostettaessa tapahtui jonkin verran kivisillä mailla. Katkenneet juuret otettiin mukaan nostamalla ne erikseen ylös ja arvioimalla niiden sijainti. Taimen noston jälkeen ravisteltiin juuriin tarttunut maa varovasti pois ja tehtiin mittaukset. Koska juurten havaittiin jäykkyytensä vuoksi asettuvan lähelle maassa muotoutunutta asentoaan, katsottiin mittaukset voitavan tehdä riittävän luotettavasti.

Juuriston kuvaamiseksi tehtiin seuraavat mittaukset:

— Keskusjuuriston suurin syvyys 1 cm:n tarkuudella maanpinnasta juuren 1 mm:n läpimittaan asti.
— Laskettiin pääjuuresta lähtevät pitkäjuuret ja mitattiin kunkin juuren tyven etäisyys maanpinnasta 1 cm:n tarkkuudella.
— Syvyysmittaukset toistettiin pitkäjuurista 10 cm:n välein juuren päähän asti tai korkeintaan 50 cm:n etäisyyteen.
— Jokaiselta 10 cm:n matkalta laskettiin kustakin pitkäjuuresta lähtevät yli 1 cm:n pitkät juuren haarat, joita tässä tutkimuksessa kutsutaan lyhytjuuriksi.
— Huomautuksina merkittiin muistiin juuriston tai erillisten juurien epänormaali muoto tai sijainti käyttäen esim. termejä juuri surkastunut, taipunut, rungon tyvi paksuuntunut, jne.

The following symbols were measured:

— The maximum depth of the central root system measured with 1 cm accuracy from the soil surface to a root diameter of 1 mm.
— The long roots branching off the main root were counted, and the depth of the base of each root from the soil surface was measured with 1 cm accuracy.
— The depth measurements of the long roots were repeated at 10 cm intervals to the end of the root or to a maximum distance of 50 cm.
— At each 10 cm interval those root branches off the long root were counted which exceeded 1 cm in length. These roots are here called short roots.
— Notes were made on abnormal shape and position of the root system or individual roots, e.g. as follows: the roots stunted, bent, base of the stem enlarged, etc.

Juuriston rakenne kuvattiin matemaattisesti yhdellä luvulla sijoittamalla eräät mittauksista saadut arvot tätä varten kokeellisesti muodostettuun kaavaan, johon perustuvaa lukua kutsutaan juuristoindeksiksi. Kaavan valinnassa meneteltiin siten, että otettiin kolme selvästi toisistaan poikkeavaa mallijuuristoa ja eri laskentavaihtoehtoja käyttämällä etsittiin kaava, joka toi esiin juuristojen erot. Juuristoindeksillä pyritään siten kuvaamaan yhdellä luvulla haarottuneisuuden ja eri ulottuvaisuuksien yhteisvaikutusta.

Kaava on muotoa: $JI = (5a + b_{1-n} + c_{0-50} + d)\ f$, jossa

a = keskusjuuriston syvyys, cm
b_{1-n} = pitkäjuurien pituuksien summa, cm
c_{0-50} = pitkäjuurien syvyyksien summa kohdilta 0, 10, 20, 30, 40 ja 50 cm
d = lyhytjuurien lukumäärä. Syvyydellä 0—10 cm olevien lyhytjuurien kerroin on 1, syvyydellä 11—20 cm kerroin on 2 ja syvyydellä yli 20 cm kerroin on 3.
f = pääjuurikerroin. f = 1.3, jos pääjuuri on normaali; f = 1.2, jos pääjuuri on taipunut; f = 1.0, jos pääjuuri on surkastunut.

The equation is: $JI = (5a + b_{1-n} + c_{0-50} + d)\ f$, where
a = depth of central root system, cm
b_{1-n} = sum of the lengths of long roots, cm
c_{0-50} = sum of the depths of the long roots at 0, 10, 20, 30, 40, and 50 cm intervals
d = number of short roots. The factor for short roots at 0—10 cm depth = 1, at depth 11—20 cm = 2, and over 20 cm = 3.
f = factor for main root. f = 1.3 if main root is normal; f = 1.2 if main root is bent; and f = 1.0 if main root is stunted.

Indeksiä ei voida käyttää virheettömästi taimilla joiden juuret ulottuvat yli 50 cm:n etäisyyteen rungosta edellä kuvatun taimien maasta nostomenettelyn johdosta. Tosin taimia, joiden juuret ulottuivat yli ko. etäisyyden oli kerätyssä aineistossa pääasiallisesti vain pisimpien yli 100 cm:n pituisten taimien joukossa, joiden kuvaamisessa ei indeksiä tulosten käsittelyosassa käytetä. Kuten indeksin kertoimista nähdään, annettiin enemmän painoa syvälle ulottuville juurille sekä pääjuureltaan normaalina pidettävälle juuristolle.

23. Kasvupaikan luokitus ja mittaus

Koealan keskipisteeseen tehtiin maaleikkaus, josta mitattiin 1 cm:n tarkkuudella humuskerroksen sekä A- ja B-horisontin paksuudet. Eri kerrosten erottamisessa käytettiin Aaltosen (1940) esittämiä tunnuspiirteitä. Jos kerrosten paksuudet muuttuivat selvästi koealan muissa näytteenottokohdissa, mitattiin ne myös sieltä, ja koealakuvauksessa käytettiin keski-

määräisiä arvoja. Maanäytteet otettiin koealan keskipisteestä sekä pääilmansuunnista 20 m:n etäisyydeltä 0—10, 10—20 ja 20—30 cm:n kerroksista. Näytteen koko oli noin 2/3 litraa. Näytteistä määritettiin Viljavuuspalvelu Oy:n toimesta lajitekoostumus. Käytetty menetelmä oli E l o s e n kehittämä sedimentaatiomenetelmä (E l o n e n 1971).

Maan luokituksessa tyydyttiin aineiston käsittelyssä erittelemään hiedan ja hietaa sekä hienoa hietaa ja hiesua hienompien lajitteiden prosenttiset osuudet lajitekoostumuksesta. Ko. raja-arvoja hienompien lajitteiden osuus kuvaa maan vedenläpäisevyyttä.

Koealoilta mitattiin kivisyys käyttäen V i r o n (1952) esittämää menetelmää. Hänen mukaansa tieteellisessä tutkimuksessa on tehtävä vähintään 140 havaintoa yhtä hehtaaria kohti. Tässä työssä otettiin havainnot samoista ristikkäistä suunnista, joista oli mitattu taimet ja otettu maanäytteet, kustakin suunnasta 30 havaintoa 1 m:n välein. Koealalta, jonka koko oli n. 0.3 ha otettiin näin ollen 120 havaintoa, joten lukumäärää voitaneen pitää riittävänä koealueen kivisyysindeksin selvittämiseksi.

On tunnettua, että tiivis maa estää juurten kasvua ja kehittymistä (A a l t o n e n 1919, H i d d i n g ja van der B e r g 1960, K r e u t z e r 1961, E l g a b a l y ja E l g h a m r y 1970). Tämän vuoksi yritettiin mitata maan tiiviys. Sen määritys tehtiin mekaanisesti ns. proktorneulan avulla. Menetelmän käyttöä on selostanut mm. L e h t i n e n (1967). Tiiviysmittaukset tehtiin koealoilla suurin piirtein samoista kohdista, joista maanäytteet otettiin. Jokaisesta kohdasta tehtiin 5 painallusta kivennäismaan pinnasta.

Proktorneula on helppo- ja nopeakäyttöinen, mutta sen käyttöalue on varsin rajoitettu. Se ei sovellu kivisille maille, koska tulokset olisivat erittäin epätarkkoja terän painuessa kiviä vasten. Myös kasvien juurten on todettu jossain määrin haittaavan laitteen käyttöä.

3. TUTKIMUSTULOKSET

31. Taimien juuriston rakenne ja kehitys

Jo silmämääräisin havainnoin huomattiin, että istutustaimien juuristo poikkesi rakenteeltaan huomattavasti kylvö- ja luonnontaimien juuristosta. Juuriston rakenne on luonnollisesti syntytavan ohella riippuvainen taimen iästä ja siten myös verson pituudesta. Jotta em. seikat olisivat tulleet otetuiksi huomioon eri tekijöiden vaikutusta selviteltäessä, ryhmiteltiin taimet syntytavan perusteella luontaisiin, kylvö- ja istutustaimiin sekä verson pituuden perusteella seuraaviin pituusluokkiin: 30—50, 51—70, 71—100 ja 101—150 cm. Edelleen taimet luokiteltiin jo edellä kerrottuihin kuntoluokkiin: hyväkuntoiset, huonokuntoiset ja kuolleet.

Taulukossa 1 esitetään taimien jakaantuminen kuhunkin luokkaan. Taimien määrä eri luokissa ei ole yhtä suuri, vaan vaihtelee tutkimusmenetelmästä johtuen hyvinkin paljon. Hyväkuntoisia taimia on aineistossa pituusluokassa 30—50 cm varsin runsaasti, mikä selittynee sillä, että taimet, jotka ovat selviytyneet alkuvaikeuksistaan, eivät ole vielä tulleet vaiheeseen, jolloin tuhoutuminen taimistossa on jälleen runsasta. Kuolleita luonnontaimia ei sattunut aineistoon mukaan kuin kaksi kappaletta, jotka kuuluivat pituusluokkaan 71—100 cm. Taimet todettiin lumikaristeen tappamiksi. Niitä ei vähälukuisuutensa ja tuhoutumisen syyn vuoksi otettu mukaan tulosten käsittelyyn. Kuolleiden luonnontaimien harvinaisuus on varsin kuvaavaa, koska myöskään tuhoutuneiksi luokiteltavia luonnontaimistoja ei normaalilta metsämaalta etsinnästä huolimatta löydetty.

Pääjuureltaan tyypillisiksi luokiteltuja taimia oli tutkimuksen aineiston kylvötaimista 80.1 %, istutustaimista 8.1 % ja luontaisesti syntyneistä 59.7 %. Istutustaimien pääjuurista oli 45.2 % taipunut ja 46.7 % kokonaan surkastunut. Pääjuurten muoto ja esiintyminen on siten istutustaimilla olennaisesti poikkeava kylvö- ja luonnontaimista. Pääjuuren kehitykseen vaikuttaa myös maan kivisyys. Selvästi todettuja kivisyyden taivuttamia tai surkastamia pääjuuria oli kuitenkin vain 4.7 %:lla kaikista taimista. Kivisyyden vaikutus istutettujen taimien pääjuureen on todennäköisesti vähäinen, koska istuttaja yleensä valitsee kivettömän kohdan työnsä helpottamiseksi. Kuten edellä esitetyistä luvuista huomataan, eivät luontaiset eivätkä kylvötaimetkaan Pohjois-Suomen oloissa aina muodosta selvää

Taulukko 1. Syntytavaltaan ja kunnoltaan erilaisten taimien määrä eri pituusluokissa.
Table 1. The number of seedlings of modes of origin and different conditions in different height classes.

Verson pituusluokka, cm *Height class of the shoot, cm*	Kylvötaimet — *Sowed*						Istutustaimet — *Planted*						Luont. — *Volunteers*			
	Hyväkuntoiset *Good*		Huonokuntoiset *Poor*		Kuolleet *Dead*		Hyväkuntoiset *Good*		Huonokuntoiset *Poor*		Kuolleet *Dead*		Hyväkuntoiset *Good*		Huonokuntoiset *Poor*	
	kpl no	%	kpl no	%	kpl no	%	kpl no	%	kpl no	%	kpl no	%	kpl no	%	kpl no	%
30— 50	109	92	7	6	3	2	54	61	28	32	6	7	49	72	19	28
51— 70	27	47	24	42	6	11	41	62	18	27	7	11	22	85	4	15
71—100	12	43	9	32	7	25	15	47	9	28	8	25	15	49	16	51
101—150	6	30	8	40	6	30	4	28	5	36	5	36	11	73	4	27

pääjuurta. Huomattavaa on edelleen, että tutkimuksen aineiston painopiste on hyväkuntoisissa ja huonokuntoisissa taimissa ja kuolleita taimia on tullut mukaan vähänlaisesti. Tutkittavaksi ei voitu ottaa useita vuosia kuolleina olleita taimia, koska juuristo olisi saattanut olla jo lahonnutta. Mukaan otettiin kuolleista taimista vain sellaiset, joiden arvioitiin kuolleen 1—3 viimeisen vuoden kuluessa.

Taulukossa 2 esitetään keskusjuuriston syvyys maanpinnasta mitattuna keskiarvoina eri pituusluokissa. Taulukosta ilmenee myös eri syntytapaluokkien keskiarvojen merkitsevyys, joka on testattu student t-testillä. Tapauksessa, jossa ero on tilastollisesti merkitsevä (5 % riskillä), se on merkitty taulukkoon x-merkillä testattujen arvojen väliin ja kylvö- ja luonnontaimien osalta viimemainitun luvun jälkeen. Samaa menettelyä käytetään myös muissa myöhemmin esitettävissä taulukoissa.

Taulukko 2. Keskusjuuriston syvyys (cm maanpinnasta) taimien verson pituus-, kunto- ja syntytapaluokittain. x = ero merkitsevä (riski 5 %) rinnakkaisten lukujen välillä. Jos ero on merkitsevä kylvö- ja luonnontaimien välillä, x-merkki on luonnontaimien sarakkeessa luvun jälkeen (taulukot 2—5 ja 7).

Table 2. The depth (cm) of the central root system from the soil surface; the height-, condition-, and mode-of-origin classification of the seedlings. x = significant difference (at the 95 % level of probability) between adjacent numbers. If the difference between the sowed and volunteer seedlings is significant, the x-sign is placed after the number in the column for volunteers (Tables 2—5 and 7).

Pituusluokka, cm *Height class, cm*	Hyväkuntoiset *Good condition*			Huonokuntoiset *Poor condition*			Kuolleet *Dead*	
	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*
30— 50	13.6x	8.1x	12.9	13.1	10.9	11.6	11.3	9.3
51— 70	17.9x	8.9x	15.6	18.3x	12.5x	19.8	16.7x	9.0
71—100	20.7x	10.1x	19.6	19.2	14.7	16.4	15.4	13.1
101—150	23.8x	7.5x	18.4	25.5	16.4	23.3	20.2x	10.2
$\bar{x}$	19.0	8.7	16.6	19.0	13.6	17.7	15.9	10.4

Kaikissa pituus- ja kuntoluokissa on istutustaimien keskusjuuriston syvyys selvästi pienempi kuin kylvö- ja luonnontaimilla, pisimmillä taimilla jopa puolet pienempi, mikä johtuu juuri siitä, että istutustaimille ei yleensä kehity hyvin muodostunutta, alaspäin suuntautuvaa pääjuurta. Kylvötaimilla näyttää olevan hieman syve mpi keskusjuuristo kuin luontaisesti syntyneillä. Kun otetaan huomioon istutussyvyys näyttää siltä, että istutustaimien juuristot ovat istutuksen jälkeen kasvaneet syvyyssuuntaan vain vähän tai ei ollenkaan. Sitä vastoin kylvö- ja luonnontaimet ovat syventäneet juuristoaan taimen kasvaessa pituutta. Keskimäärin syveneminen on ollut n. 10 cm sinä aikana, kun taimet ovat kasvaneet pituutta 50—100 cm. Keskusjuuriston syvyydessä ei hyväkuntoisiksi ja huonokuntoisiksi luokitel-

luilla taimilla ole sanottavaa eroa. Kuolleiden kylvötaimien juuristo näyttää olevan kaikissa pituusluokissa jonkin verran (1—5 cm) pinnallisempi kuin parempikuntoisilla taimilla. Sen sijaan istutustaimien välillä eri kuntoluokissa huonokuntoiset taimet näyttävät olevan syväjuuristoisimpia ja hyväkuntoisten taimien juuristot ovat pinnallisimpia.

Juuristoista mitattiin myös pitkäjuurien ja lyhytjuurien (vrt. s. 9) lukumäärät sekä pitkäjuurien keskipituus. Tulosten luokittaiset keskiarvot nähdään taulukossa 3. Tuloksia tarkasteltaessa on huomattava, että lyhytjuurista laskettiin vain yli 1 cm:n pituiset juuret. Taimia ylösnostettaessa saattoi juuria myös katkeilla. Lyhytjuurien lukumäärän ja pitkäjuurten keskipituuden osalta ei esitetä tuloksia yli 100 cm:n pituisten taimien luokassa, koska osa ko. taimien pitkäjuurista ulottui jo yli 50 cm:n etäisyyteen rungosta ja tulivat siten taimia ylösnostettaessa katkaistuiksi.

Taulukko 3. Pitkäjuurien lukumäärän ja pituuden sekä lyhytjuurien lukumäärän keskiarvo taimien eri syntytapa- ja pituusluokissa. Selitykset ks. taulukko 2, s. 14.
Table 3. The means for the number and length of long roots and the number of short roots in different height- and mode-of-origin classes of the seedlings. For explanation see Table 2, p. 14.

Pituusluokka, cm *Height class, cm*	Pitkäjuuret — *Long roots*						Lyhytjuuret *Short roots*		
	Kpl — *number*			Keskipituus, cm *Mean length, cm*			Kpl — *number*		
	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*
30— 50	12.9	13.2	12.3	12.2	8.7	11.8	29.6	20.4	22.7
51— 70	15.3	12.5	14.6	15.1	14.1	16.1	46.5	41.8	41.0
71—100	14.1	13.5	14.7	19.9	19.5	19.5	54.6	53.9	56.6
101—150	17.3	12.3	15.1						

Pitkäjuurten lukumäärä kasvaa jonkin verran taimien pituuden suuretessa kylvö- ja luonnontaimilla, mutta istutustaimilla lukumäärä pysyy samana. Tämä seikka näyttää edelleen korostavan jo pääjuuren osalta todettua istutustaimien juuriston heikkoa kehitystä. Istutustaimien juuristo laajenee lähinnä sivujuurien kasvun ja niihin kehittyvien uusien sivujuurien avulla, mitä osoittaa lyhytjuurien lukumäärän voimakas suureneminen taimien kasvaessa.

Lyhytjuurien lukumäärä syntytavaltaan erilaisissa taimissa on kussakin pituusluokassa suurin piirtein samaa suuruusluokkaa. Ainoastaan pienikokoisilla kylvötaimilla näyttää haaroittuminen olevan muita taimia voimakkaampaa, mikä ero kuitenkin tasoittuu myöhemmin. Pitkäjuurten keskipituus on erisyntyisillä taimilla saman suuruinen ja kasvaa suhteellisen tasaisesti taimien kasvaessa.

Havainnot maastossa osoittivat, että istutustaimien juuristo istutustavasta johtuen on usein hyvin toispuolinen sivujuurten kasvaessa vain yhteen suuntaan ja toisen puolen jäädessä kehittymättä. Juuristoindeksiluku (JI) esitetään taulukossa 4. Tässäkin tapauksessa jätetään pisimmän taimiluokan (101—150 cm) juuristoindeksiluvut esittämättä yli 50 cm:n pituisten juurten katkaisemisen vuoksi.

Taulukko 4. Juuristoindeksin keskiarvo taimien pituus- ja kuntoluokissa. Selitykset ks. taulukko 2, s. 14 ja sivut 9—.1

Table 4. The mean of the root system index in the height- and condition classes of the seedlings. For explanation see Table 2, p. 14 and pp. 9—10.

Pituusluokka, cm *Height class, cm*	Hyväkuntoiset *Good condition*			Huonokuntoiset *Poor condition*			Kuolleet *Dead*	
	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*
30— 50	466x	270x	404	597x	322	430	305	212
51— 70	712x	387x	612	713x	493x	852	511	350
71—100	977x	674	882	765	670	687	707x	445

Hyväkuntoisissa taimissa juuristoindeksiluku suurenee tasaisesti taimien pituusluokan suuretessa. Tässäkään tapauksessa ei, kuten ei keskusjuuriston syvyyden osaltakaan, ole kovin paljon eroa kylvö- ja luonnontaimien välillä. Kylvötaimilla indeksiluku on jonkin verran suurempi, mutta ero ei ole tilastollisesti merkitsevä. Sen sijaan istutustaimen juuristo on merkittävästi heikompi rakenteeltaan kuin kylvö- ja luonnontaimien juuristo. Erot huonokuntoisten taimien osalta ovat samansuuntaiset, mutta luonnontaimien indeksiluku 51—70 cm:n pituusluokassa on poikkeuksellisen suuri. Eroa hyväkuntoisten ja huonokuntoisten taimien välillä ei tässä suhteessa käytännöllisesti katsoen esiinny. Kuolleitten taimien indeksiluvut ovat kaikissa tapauksissa selvästi pienempiä kuin vielä elävien taimien. Kun verrataan indeksilukuja edelleen taulukon 2 tuloksiin keskusjuuriston syvyydestä, näyttää siltä, että indeksiluku kuvaa paremmin taimien kuntoa kuin juuriston syvyys. Tähän päätelmään voi tulla, koska erikuntoisten viljelytaimien välillä esiintyvät erot tasoittuvat ja kääntyvät mielekkäämpään järjestykseen. Esimerkkinä edellä esitetystä voidaan mainita 71—100 cm:n pituiset kunnoltaan erilaiset istutustaimet (vrt. taulukot 2 ja 4).

32. Taimien verson kunto ja sen riippuvuus juuristosta

Taimet luokiteltiin verson kunnon perusteella kolmeen luokkaan: hyväkuntoiset, huonokuntoiset ja kuolleet. Kriteerinä eri luokkien välillä käytettiin etenkin neulaskuolleisuutta. Jako on jossain määrin subjektiivinen,

mutta se katsottiin työhön tarkoituksenmukaiseksi ja riittävän tarkasti luokiteltavaksi. Taimien kehityksen kuvaajana käytettiin myös latvaverson kahden viimeisen vuoden pituutta. On todettu nimittäin, että juurimäärät selittyvät hyvin puiden kasvun avulla (A i t o l a h t i 1969).

Taulukossa 5 esitetään mittausten tulokset taimien eri pituus-, kunto- ja syntytapaluokissa. Kun tarkastellaan hyväkuntoisten taimien verson pituuskasvua, todetaan sen suurenevan jokseenkin tasaisesti taimien pituuden kasvaessa aina n. 1 m:n pituisiin taimiin saakka ja jossain määrin vielä yli 1 m:n mittaisilla istutus- ja luonnontaimilla, mutta kylvötaimien pituuskasvun nopeus sitä vastoin heikkenee yli metrin mittaisissa taimissa. Täysin samanlainen kehitys on tapahtunut myös huonokuntoisilla taimilla. Hyväkuntoiset taimet näyttävät kasvavan jonkin verran paremmin kuin huonokuntoisiksi luokitellut, mikä on luonnollista, koska kuntoluokituksessa juuri kiinnitettiin huomiota verson kuntoon ja hyvin kasvava taimi yleensä näyttää hyväkuntoiselta. Luontaisesti syntyneiden taimien heikompi kasvu viljelytaimiin verrattuna johtunee kasvupaikkojen ravinteisuuseroista.

Taulukko 5. Latvaverson kahden viimeisen vuoden (1969—70) yhteenlaskettu pituus (cm) taimien eri kunto-, syntytapa- ja pituusluokissa. Selitykset ks. taulukko 2, s. 14.
Table 5. The total length (cm) of the two leaders for the last two growing seasons (1969—70) in different classes of condition, mode- of -origin and height of the seedlings. For explanation see Table 2, p. 14.

Pituusluokka, cm *Height class, cm*	Hyväkuntoiset *Good condition*			Huonokuntoiset *Poor condition*		
	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*
30— 50	19.2x	15.8x	13.8x	15.9	12.6	10.7x
51— 70	24.8x	21.0	18.7x	18.8	16.3	15.3
71—100	30.9	27.6x	18.7x	16.4x	26.4x	13.9
101—150	22.2	29.5	20.6	9.1x	29.0	16.3

Verrattaessa juuristoindeksin ja verson pituuskasvun välistä riippuvuutta korrelaatioanalyysillä, saatiin suurimmaksi korrelaatiokertoimeksi 0.37, joka 95 %:n luotettavuudella on tilastollisesti merkitsevä.

Taulukossa 6 esitetään lyhytjuurien keskimääräiset lukumäärät taimien pituus- ja kuntoluokittain. Pituusluokka 101—150 cm on jätetty taulukosta pois, koska ko. luokan taimien pitkäjuuret joissakin tapauksissa ulottuivat yli 50 cm:n etäisyyteen taimesta ja tulivat näin ollen tutkimusmenetelmästä johtuen katkaistuiksi. Lyhytjuurten lukumäärä suurenee taimien pituuden kasvaessa, kuten jo todettiin taulukon 3 perusteella. Hyväkuntoisissa taimissa on alle 71 cm:n pituisissa vähemmän lyhytjuuria kuin huonompikuntoisissa, mutta 71—100 cm:n pituisten taimien juuristossa huonokuntoisissa on vähemmän lyhytjuuria kuin hyväkuntoisilla. Ero kuolleisiin taimiin on kuitenkin selvä kaikissa tapauksissa vielä elossa olevien taimien hyväksi.

Taulukko 6. Lyhytjuurien keskimääräinen lukumäärä taimien pituus- ja kuntoluokissa.
Table 6. The average number of short roots in the classes of height and condition of the seedlings.

Pituusluokka, cm *Height class, cm*	Hyväkuntoiest *Good condition*	Huonokuntoiset *Poor condition*	Kuolleet *Dead*
30— 50	19.4	27.9	9.2
51— 70	37.6	43.9	18.6
71—100	61.9	45.7	29.7

Taimista mitattiin myös rungon läpimitta maanpinnan tasalta kuoren päältä. Eri luokkien keskiarvot esitetään taulukossa 7.

Taulukko 7. Taimien rungon läpimitta (mm) maanpinnan tasalta eri kunto-, syntytapa- ja pituusluokissa. Selitykset ks. taulukko 2, s. 14.
Table 7. The stem diameter (mm) of the seedling at ground level in the different classes of condition, mode- of -origin and height. For explanation see Table 2, p. 14.

Pituusluokka, cm *Height class, cm*	Hyväkuntoiset *Good condition*			Huonokuntoiset *Poor condition*			Kuolleet *Dead*	
	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*
30— 50	12.4x	10.7	10.8x	15.0	13.7	13.0	12.3	12.5
51— 70	17.9	17.5	17.1	19.2	19.3x	19.0	20.5	19.9
71—100	22.3	26.3	24.8	25.1	22.1x	20.9	33.0	29.4
101—150	29.8	30.3	28.8	36.5	32.6x	21.5x	34.0	39.0

Rungon läpimitan juurenniskan yläpuolella on todettu olevan tietyssä riippuvuussuhteessa juuristoon. On esitetty, että taimen tyvi paksunee, jos juuriston toiminnassa ilmenee häiriöitä. Paksunnoksen aiheuttanevat versosta juuristoon tulevat yhteyttämistuotteet, joita juuristo ei kykene maan epäedullisissa fysikaalisissa olosuhteissa käyttämään (K r a m e r 1951).

Saadut mittaustulokset (taulukko 7) osoittavat, että hyväkuntoisissa taimissa pituusluokassa 30—50 cm kylvötaimet ovat tyveltään paksumpia kuin istutus- ja luonnontaimet, mutta muissa pituusluokissa ei esiinny syntytavaltaan erilaisissa hyväkuntoisissa taimissa tilastollisesti merkitsevää eroa. Huonokuntoisilla taimilla on ero merkitsevä syntytavaltaan erilaisten taimien välillä ainoastaan pisimmillä taimilla siten, että luontaiset taimet ovat rungoltaan ohuempia kuin viljelytaimet samanpituisina. Huonokuntoiset ja kuolleet viljelytaimet ovat tyveltään paksumpia kuin hyväkuntoiset taimet. Erityisesti näin on asian laita pisimpien viljelytaimien kohdalla.

Selvästi silmämääräisesti havaittavia tyvilaajentumia oli yhteensä 23 istutustaimella, 12 kylvötaimella ja vain yhdellä luontaisesti syntyneellä

taimella, joka sekin saattoi olla istutustaimi, koska se kasvoi istutusalalla. Tyvilaajentumia oli ensisijaisesti taimissa, joiden siemenen alkuperästä ei ollut tietoa tai alkuperä oli selvästi eteläistä rotua, esim. Vaalasta tai Valtimosta Kittilään tai Sodankylään tuotua.

33. Taimien verson kunto ja sen riippuvuus maan ominaisuuksista

Taimistojen kasvupaikoilta mitattiin maakerrosten paksuudet ja tehtiin mekaaninen maa-analyysi 0—10, 10—20 ja 20—30 cm:n syvyydeltä kivennäismaasta otetuista näytteistä. Lisäksi mitattiin maan kivisyys ja osalta koealoja mekaanisesti tunkeumavastuksena maan tiiviys sivulla 11 kuvatulla tavalla.

Taulukossa 8 nähdään taimien kasvupaikkojen eri maahorisonttien paksuudet taimien kunto- ja syntytapaluokkien mukaan ryhmiteltyinä. Havaitaan, että kylvötaimistoissa humuskerros on ohuempi kuin istutus- ja luonnontaimistoissa. Ero johtunee siitä, että istutustaimistoihin verrattuna kylvöt on todennäköisesti perustettu ohutkunttaisemmille maille ja toisaalta kylvöalueet on yleensä kulotettu ennen viljelyä. Istutustaimistoissa humuskerroksen paksuus on suurin. Huonokuntoisten taimistojen humuskerros on yhtä paksu kuin hyväkuntoisten taimistojenkin. Yllättävää on se seikka, että tuhoutuneissa taimistoissa, erityisesti istutustaimistoissa, humuskerros on ohuempi kuin vastaavissa parempikuntoisissa taimistoissa. Todennäköisesti ko. taimistojen kunttakerros on poltettu ennen viljelyä kulottamalla. Ainakaan kunttakerroksen paksuus ei siis sellaisenaan ole voinut aiheuttaa taimien kuolleisuutta tai huonokuntoisuutta.

Tulokset A-horisontin paksuudesta ovat samanlaiset kuin humuskerroksen osalta. B-horisontin paksuudessa ei voida todeta merkittäviä eroja kunnoltaan erilaisissa taimistoissa. Luontaisesti syntyneissä taimistoissa A-horisontti näyttää olevan hieman ohuempi ja B-horisontti hieman paksumpi kuin viljelytaimistoissa. Männyn luonnontaimistot syntyvät yleensä kui-

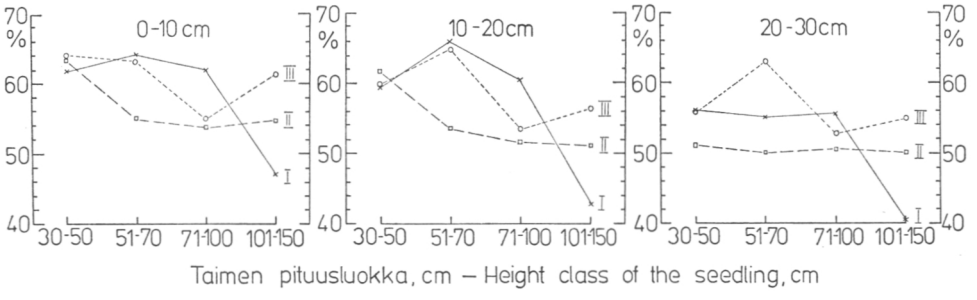
Taulukko 8. Humuskerroksen sekä A- ja B-horisonttien paksuudet (cm) taimistojen kunto- ja syntytapaluokittain.

Table 8. The thickness (cm) of the humus layer and the A and B horizons for the classes of condition and mode- of -origin of the young seedling stands.

Maakerros *Soil horizon*	Hyväkuntoiset *Good condition*			Huonokuntoiset *Poor condition*			Kuolleet *Dead*	
	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*	Luont. *Volunteer*	Kylvö *Sowed*	Ist. *Planted*
Humus	3.8	8.6	4.9	3.4	8.6	5.0	3.4	4.8
A	11.7	12.7	9.8	11.0	13.2	9.3	9.4	10.2
B	30.1	30.3	32.4	27.2	31.8	35.8	28.9	28.3

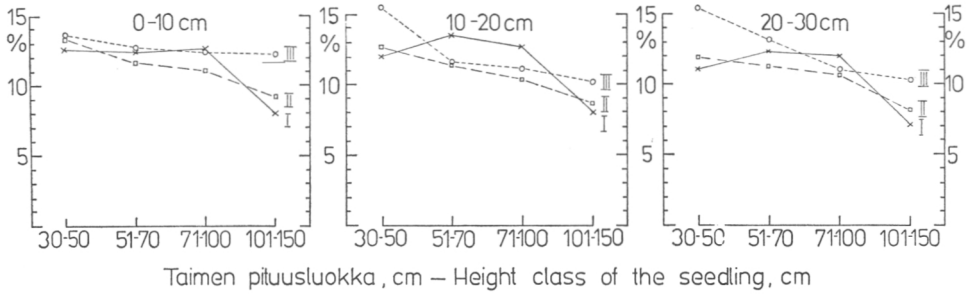
vemmille kasvupaikoille kuin viljelytaimistot, ja humuskerroksen sekä A-horisontin paksuus A a l t o s e n (1940) mukaan suurenee kuivista kangasmetsistä tuoreisiin siirryttäessä.

Taimien kasvupaikkojen maan lajitekoostumuksesta esitetään kuvat 1 ja 2, joissa nähdään erikseen hiedan (raekokoraja 0.2 mm), ja hiesun (0.02 mm) ja niitä hienompien lajitteiden osuudet (paino-%) maan lajitekoostumuksesta kunnoltaan ja pituudeltaan erilaisten taimien kohdalla eri syvyyskerroksissa. Eri kerrosten välillä on lajitejakaantumassa nähtävissä se suuntaus, että pintakerroksesta syvemmälle mentäessä hienoimpien lajitteiden osuus hieman pienenee. Kunnoltaan erilaisten taimien kasvupaikan maan lajitekoostumuksessa on selvimmin eroa pisimpien tutkittujen taimien kohdalla.



Kuva 1. Hiedan ja sitä hienompien lajitteiden osuus (paino-%) maan lajitekoostumuksesta eri syvyyskerroksissa eripituisten hyväkuntoisten (I), huonokuntoisten (II) ja kuolleiden (III) männyn taimien kasvupaikoilla.

Figure 1. The proportion of size fractions (weight-% out of all size fractions) with particle size equal to or smaller than fine sand at various depths on the sites of different size pine seedlings in good (I) or poor (II) condition or dead (III).



Kuva 2. Hiesun ja sitä hienompien lajitteiden osuus (paino-%) maan lajitekoostumuksesta eri syvyyskerroksissa eripituisten hyväkuntoisten (I), huonokuntoisten (II) ja kuolleiden (III) männyn taimien kasvupaikoilla.

Figure 2. The proportion of size fractions (weight-% out of all size fractions) with particle size equal to or smaller than silt at various depths on the sites of different size pine seedlings in good (I) or poor (II) condition or dead (III).

Kummassakin raekokoluokassa ja kaikissa syvyyskerroksissa on yli 100 cm:n pituisten kuolleiden taimien kasvupaikoilla maassa selvästi enemmän hienoja lajitteita kuin huono- tai hyväkuntoisten taimien kasvupaikoilla. Ero prosenttiyksiköissä vaihtelee keskimäärin 5—10 ja prosentteina laskettuna esim. hiesun ja hienompien lajitteiden osuus on kuolleiden taimien kasvupaikoilla maan 10 cm:n paksuisessa pintakerroksessa jopa 34 % suurempi kuin hyväkuntoisten taimien kasvupaikoilla.

Kooltaan pienimmät ja samalla todennäköisesti iältään nuorimmat taimistot ovat tämän aineiston mukaan syntyneet tai on perustettu hienompijakoisille maille kuin kooltaan suuremmat ja iältään vanhemmat taimistot. Tämä seikka osaltaan osoittaa, että männyn uudistamisessa on viime aikoina menty yhä hienojakoisemmille maille, jotka yleensä ovat ennen hakkuuta olleet puustoltaan kuusivaltaisia.

Tutkittaessa maan tiiviyttä mekaanisesti proktorneulalla saatiin kivettömien maiden huonokuntoisten ja kuolleiden taimien kasvupaikoilla keskimääräiseksi tunkeumavastukseksi 18.5 kg/cm² ja hyväkuntoisten taimien kasvupaikoilla 14.7 kg/cm². Keskimääräinen kivisyysindeksi (Si ≷ 30 cm) oli vastaavasti ensinmainituissa 21.0 ja viimemainituissa 20.6.

Kivisyydessä ei siis käytännöllisesti katsoen ollut eroa kunnoltaan erilaisten taimien kasvupaikoilla, mutta maa oli selvästi tiiviimpää huonokuntoisten ja kuolleiden taimien kasvupaikoilla verrattuna hyväkuntoisten taimien kasvupaikkoihin.

Aineiston perusteella laskettiin myös maan hienoimpien lajitteiden keskimääräiset prosenttiosuudet lajitekoostumuksesta syntytavaltaan erilaisissa taimistoissa. Luokituksessa pitäydyttiin aineiston esittelyn yhteydessä s. 8 esitetyssä ryhmittelyssä, jolloin siis taimistot ryhmiteltiin neljään luokkaan. Luonnontaimistot (5 kpl), kylvötaimistot (14 kpl), istutustaimistot (10 kpl) sekä taimistot (19 kpl), joissa oli tehty sekä kylvöä että istutusta. Tulokset, jotka esitetään vain maan pintakerroksen (0—10 cm) osalta, nähdään taulukossa 9.

Taulukko 9. Hienoimpien lajitteiden osuudet (%) maan lajitekoostumuksesta eri tavalla syntyneissä taimistoissa.

Table 9. The proportions (%) of the finest size fractions out of all fractions in young seedling stands of different origins.

Taimien syntytapa *Mode of origin of seedling*	Raekokoraja *Limit of particle size, mm*		
	≷ 0.2	≷ 0.06	≷ 0.02
Luontainen — *Natural*	45.8	16.8	7.9
Kylvö — *Sowed*	66.4	26.9	10.7
Kylvö ja ist. — *Sowed and planted*	60.3	29.8	13.6
Istutus — *Planted*	61.4	31.8	14.6

Luontaiset männyn taimistot ovat selvästi karkeammilla mailla kuin viljelytaimistot. Kylvötaimistoissa on hiedan (<0.2 mm) ja sitä hienompien lajitteiden osuus maan lajitekoostumuksesta suurin, mutta jo hienon hiedan (<0.06) ja sitä hienompien lajitteiden sekä myös hiesun (<0.02 mm) ja hienompien lajitteiden osuus on istutustaimistoissa suurin. Tämä ilmiö selittynee sillä, että kylvötaimistoja on eniten lajittuneilla mailla. Hienoa hietaa (0.2—0.06 mm) onkin kylvötaimistoissa keskimäärin 40 % kun sitä vastoin istutus- ja luonnontaimistoissa sitä on vain vajaa 30 % maan lajitekoostumuksesta. Istutustaimistoissa on vettä erittäin huonosti läpäisevän hiesun ja sitä hienompien lajitteiden osuus jopa lähes kaksinkertainen verrattuna luonnontaimistoihin. Näin voimakas ero saattaa omalta osaltaan selittää myös sitä seikkaa, että tuhoutuneita luonnontaimistoja ei etsiskelyistä huolimatta löydetty, mutta tuhoja löytyi kyllä huolestuttavassa määrin istutus- sekä kylvötaimistoista.

4. TULOSTEN TARKASTELU

Pohjois-Suomessa tehtyjen männyntaimistojen inventointitutkimusten mukaan on viljelyjen onnistumisprosentti jäänyt alhaiseksi (S o l i n 1970, V a l t a n e n 1970 a, E t h o l é n 1971). Syitä epäonnistumisiin on yritetty selittää monin tavoin. On mm. tehty havaintoja, että istutettujen paljasjuuristen männyntaimien luonnontaimista poikkeava juuriston rakenne olisi osasyynä taimien kuolemiseen (V a l t a n e n 1970 b). Tämän tutkimuksen tarkoituksena onkin selvittää syntytavaltaan erilaisten männyn taimien juuriston rakennetta sekä eräiden maan fysikaalisten tekijöiden, kuten tiiviyden, kivisyyden ja hienojen lajitteiden runsauden sekä humuskerroksen paksuuden vaikutusta juurten kehitykseen ja taimen kuntoon.

Saatujen tulosten mukaan paljasjuurisina istutettujen männyn taimien juuristo eroaa huomattavasti kylvö- ja luonnontaimien juuristosta. Suurin ero on pääjuuren erilaisessa kehityksessä. Istutustaimilla kehittyy männylle ominainen pääjuuri vain harvoin. Useimmiten se on sivulle taipunut tai jopa kokonaan surkastunut. Vain 8 %:ssa istutustaimista todettiin esiintyvän tyypillinen, alaspäin suuntautunut pääjuuri. Syynä epämuodostumiin voitaneen pitää istutustapaa, jonka vaikutusta korostavat Pohjois-Suomen kylmästä ja humidisesta ilmastosta aiheutuvat maan haitalliset fysikaaliset ominaisuudet (L ä h d e 1970, 1971). Erityisesti kourukuokkaistutusta käytettäessä juuret pakotetaan epänormaaliin asentoon. Kun on kysymys männyn taimista, jotka eivät pysty yleensä kehittämään myöhäisjuuria, tämä virhe korjaantuu hitaasti, jos ollenkaan. Haitalliset vaikutukset taimien juuristoon ovat sitä suuremmat, mitä myöhemmässä kehitysvaiheessa taimet istutetaan (W i b e c k 1923). Kourukuokkaistutusta tai vastaavia istutustapoja käytettäessä juuria ei levitetä tasaisesti istutuskuoppaan, vaan ne pakotetaan usein kasvamaan vain yhteen suuntaan. Jos pitää paikkansa toteamus, että uusia juuria ei synny siten, että syntyvä juuri muodostaisi alkuperäisen juuren kanssa kasvusuuntaan nähden yli 90°:n kulmaa (H e r t z 1935), saattaa käydä siten, että juuristo säilyy toispuolisena koko olemassaolon ajan. Juuristoltaan toispuoliset puut ovat luonnollisesti erittäin alttiita myrskytuhoille. Istutuksessa tehtävät virheet saattavat myöhemmin jossain määrin korjautua edellyttäen, että kasvupaikan maan ominaisuudet ovat suotuisat juurten kehitykselle.

Seurauksena istutustaimien pääjuuren heikosta kehityksestä on se, että istutustaimilla koko keskusjuuristo on huomattavasti pinnallisempi kuin kylvö- tai luonnontaimilla. Pääjuuren taivuttamisesta istutuksen yhteydessä on seurauksena toisaalta se, että istutustaimien juuristo taimen kasvaessa pystyy tunkeutumaan syvemmälle maahan vain hitaasti tai ei ollenkaan. Niinpä 101—150 cm:n pituisten istutustaimien keskusjuuristo ulottui keskimäärin vain 7.5—16.4 cm:n syvyyteen, kun taas samanpituisten kylvö- ja luonnontaimien keskusjuuristo ulottui 18.4—25.5 cm:n syvyyteen. Toisaalta maan epäedulliset fysikaaliset ominaisuudet, kuten kylmyys, liika vesi ja hapen puute, voivat istutuksen ohella olla aiheuttamassa istutustaimien juuriston pinnallisuutta. Näin on todettu useissa eri tutkimuksissa (Aaltonen 1920, Laitakari 1927, Ladefoged 1939, Köstler et al. 1968, Lyr ja Hoffmann 1967 sekä Orlov ja Koshelkov 1971) ja yleensä istutukset tehdään hienojakoisemmille maille kuin kylvöt tai luontainen uudistaminen — siis pohjoisissa, humidisissa oloissa usein käsittelemättöminä liian märille ja kylmille maille.

Pohjois-Suomen olosuhteissa ei myöskään kylvö- eikä luonnontaimille aina kehity suoraan alaspäin suuntautuvaa pääjuurta. Tutkitussa aineistossa n. 80 prosentilla kylvötaimista ja n. 60 prosentilla luonnontaimista oli pääjuuri kehittynyt tyypilliseksi luokiteltavaksi.

Tulosten tulkinnassa käytettiin myös juuristoindeksilukua, jolloin yhdellä luvulla pyrittiin kuvaamaan juuriston haarottuneisuuden ja eri ulottuvaisuuksien yhteisvaikutusta. Indeksi osoitti vielä selvemmin kuin keskusjuuriston syvyys, miten voimakkaasti syntytavaltaan erilaisten männyn taimien juuristot poikkesivat toisistaan. Kylvötaimien juuristoindeksiluku oli jonkin verran suurempi kuin samankokoisilla luonnontaimilla. Istutustaimien juuristo osoittautui kaikissa tapauksissa em. taimien juuristoihin verrattuna selvästi heikkokuntoisimmaksi. Mitä pitemmäksi taimet olivat kehittyneet sitä selvemmäksi tuli ero kunnoltaan erilaisten taimien välillä siten, että hyväkuntoisten taimien juuristo oli rakenteeltaan kehittyneempi kuin huonokuntoisten tai kuolleiden taimien juuristo.

Pitkäjuurten lukumäärä suureni kylvö- ja luonnontaimien juuristossa jonkin verran taimien kasvaessa, mutta istutustaimilla ei näin näytä tapahtuneen. Lyhytjuurten lukumäärä sitä vastoin näytti olevan samansuuruinen eri tavalla syntyneissä taimissa, ja määrä suureni tasaisesti taimen kasvaessa pituutta ja juuriston kehittyessä.

Taimen verson kahden viimeisen vuosikasvaimen pituus näytti melko tasaisesti suurenevan taimen pidentyessä. Tämä kehitys tosin näytti hidastuvan kylvötaimilla yli metrin mittaisissa taimistoissa. Hyväkuntoisiksi luokitelluilla taimilla kahden viimeisen vuoden vuosikasvainten yhteispituus oli suurempi kuin huonokuntoisilla taimilla. Vastaavasti luonnontaimien kahden viimeisen vuosikasvaimen pituus oli pienempi kuin samankokoisilla

viljelytaimilla, mikä johtunee osaksi kasvupaikkojen ravinteisuuseroista ja ehkä osittain siitä syystä, että viljelytaimien alkuperä oli paikallisiin luonnontaimiin verrattuna eteläisempi, mikä merkitsee voimakkaampaa kasvunopeutta, mutta heikompaa kestävyyttä tuhoja vastaan.

Taimen rungon läpimitta juurenniskan yläpuolella suureni tasaisesti taimen pituuden suuretessa. Mielenkiintoisia ovat erot kunnoltaan ja syntytavaltaan erilaisten taimien välillä. Erot tulivat näkyviin pisimmillä yli 71 cm:n pituisilla taimilla. Huonokuntoisten taimien rungon tyvi oli paksumpi kuin hyväkuntoisilla taimilla lukuunottamatta luontaisesti syntyneitä taimia, joilla eroja ei esiintynyt. Selvästi, jo paljain silmin havaittavia tyvipaksunnoksia esiintyi 23 istutustaimella (11.5 %), 12 kylvötaimella (5.4 %) ja vain yhdellä luontaiseksi arvioidulla taimella. Ensisijaisesti oli tyvipaksunnoksia eteläistä alkuperää olevilla taimilla. K r a m e r i n (1951) mukaan paksunnos on seurausta juuriston ja verson välisten yhteyksien häiriöistä yhteyttämistuotteiden kasaantuessa rungon tyvelle, koska juuret eivät pysty käyttämään niitä maan epäedullisista fysikaalisista tekijöistä johtuen.

Tulokset osoittavatkin, että maan hienoimpien, vettä huonosti läpäisevien lajitteiden osuus oli selvästi suurempi yli metrin pituisten kuolleiden taimien kuin vielä elossa olleiden taimien kasvupaikoilla. Myös proktorneulalla tehdyt maan tiiviysmittaukset osoittivat samansuuntaisia tuloksia. Maa oli selvästi tiiviimpää kuolleiden ja huonokuntoisten taimien kasvupaikoilla kuin hyväkuntoisten taimien kasvupaikoilla.

Hiekan ja hiedan rajaa (∅ = 0.2 mm) pidetään vettä hyvin ja huonosti läpäisevän maalajitteiden raja-arvona. Mitä enemmän hietaa tai sitä hienompia lajitteita maassa on, sitä heikommin maa läpäisee vettä. Tutkitussa aineistossa oli yli metrin pituisten kuolleiden taimien kasvupaikoilla maan 10 cm:n paksuisessa pintakerroksessa hiesun ja sitä hienompien lajitteiden osuus jopa 34 % suurempi kuin hyväkuntoisten taimien kasvupaikoilla.

Näyttää siltä, että hienojen lajitteiden runsaus maassa alkaa vaikuttaa haitallisesti taimien kehitykseen vasta, kun taimet ovat saavuttaneet noin yhden metrin koon. Kunnoltaan erilaiset taimet eivät eronneet kasvupaikan maan lajitekoostumuksen suhteen alle metrin korkuisissa taimistoissa. Tulos antaa aihetta huolestuneisuuteen tulevan kehityksen suhteen. Jos perussyy taimien tuhoutumiseen on edes osittain maan haitallisissa fysikaalisissa ominaisuuksissa, on pelättävissä, että laikkuihin viljellyt taimet tuhoutuvat myöhemmin, kun haitalliset tekijät, kuten maan huonosta veden läpäisykyvystä aiheutuva liika vesi ja toisaalta hapen puute, tulevat taimien kehityksen kannalta erittäin kylminä ja humidisina kesinä ratkaiseviksi. Luonnollisesti myös käytettävän siemenen oikea alkuperä on perustekijä, jota ei voitane jättää huomioon ottamatta viljelyjä tehtäessä.

Humuskerroksen paksuus ei tutkitun aineiston perusteella näyttänyt aiheuttaneen haittaa taimien kehitykselle, koska kuolleiden taimien kasvupaikoilla humuskerros oli ohuempi kuin huonokuntoisten tai hyväkuntoisten taimien kasvupaikoilla. Syy suhteellisen ohueen humuskerrokseen kuolleiden taimien kasvupaikoilla näytti olevan metsänviljelyä edeltäneessä kulotuksessa ja laikutuksessa. Paksu humuskerros onkin pikemmin vain seuraus puiden kannalta huonoista kasvupaikan ominaisuuksista kuin syy niihin.

5. TIIVISTELMÄ

Tämä tutkimus liittyy osana Pohjois-Suomessa tehtävään männyn taimien elinympäristötutkimukseen. Aineisto sisältää koealoja Länsi- ja Itä-Lapin regioilta. Regiojako perustuu metsänviljelyn tutkijaryhmän ns. runkotutkimuksessa käytettyyn aluejakoon. Alue rajoittuu 66:n ja 68:n leveyspiirien väliin. Koealoja kertyi yhteensä 47 kpl ja niissä tutkittuja taimia yhteensä 574 kpl. Tutkittavina olivat kunnoltaan erilaisten kylvö-, istutus- ja luonnontaimien juuriston rakenne ja kehitys erilaisilla kasvupaikoilla. Pituudeltaan 30—150 cm:n taimien juuristoista mitattiin keskusjuuriston syvyys, pitkäjuurten lukumäärä ja lyhytjuurten lukumäärä pitkäjuurissa. Juuristojen rakennetta ja laajuutta verrattiin myös nk. juuristoindeksilukua käyttäen (s. 10).

Rakenteeltaan poikkesivat istutustaimien juuristot selvästi kylvö- ja luonnontaimien juuristoista, mikä näytti johtuvan istutustavasta sekä maan haitallisista fysikaalisista ominaisuuksista, kuten kylmyydestä, liika vedestä sekä siitä aiheutuvasta hapen puutteesta ja mahdollisesti myös viljelyssä käytetystä liian eteläisestä siemenen alkuperästä. Pääjuuren puuttuminen tai taipuminen sekä juuriston pinnallisuus olivat suurimpia eroja istutustaimissa muihin taimiin verrattuna. Pitkäjuurten lukumäärä oli kylvö- ja luonnontaimilla suurempi kuin samanpituisilla istutustaimilla. Taimien juurten haaroittuminen heikkeni taimien kunnon huonontuessa. Huonokuntoisilla ja kuolleilla taimilla oli rungon läpimitta juurenniskan yläpuolella suurempi kuin versoltaan hyväkuntoisiksi luokitelluilla taimilla, mikä osoittanee verson ja juuriston välisten toimintojen häiriintyneen ensinmainituissa taimissa. Jo paljain silmin havaittavia paksunnoksia esiintyi eniten istutustaimilla ja jonkin verran kylvötaimilla ja ensisijaisesti vain taimilla, joiden alkuperä oli selvästi viljelypaikkaan nähden eteläinen.

Maan hienojen, vettä huonosti läpäisevien lajitteiden osuus maan lajitekoostumuksesta oli yli 100 cm:n pituisten kuolleiden taimien kasvupaikoilla ainakin 30 cm:n syvyyteen asti selvästi suurempi kuin hyväkuntoisien taimien kasvupaikoilla. Tämä pituusraja näyttää sattuvan hyvin yksiin sen yleisenä todetun ilmiön kanssa, että pahimmat tuhot männyntaimistoissa sattuvat Pohjois-Suomessa ns. lumirajan saavuttaneissa taimistoissa. Luontaisesti syntyneissä taimistoissa ei vastaavia tuhoutumisia esiinny.

KIRJALLISUUSLUETTELO

Aaltonen, V. T. 1919. Kangasmetsien luonnollisesta uudistumisesta Suomen Lapissa I. Comm. Inst. For. Fenn. 1.

—»— 1920. Über die Ausbreitung und den Reichtum der Baumwurzeln in den Heidewäldern Lapplands. Acta For. Fenn. 14.1.

—»— 1940. Metsämaa, Porvoo.

—»— 1942. Einige Vegetationsversuche mit Baumpflanzen. Acta For. Fenn. 50: 1—33.

Ahlgren, C. E. ja Hansen, H. L. 1957. Some effects of temporary flooding on coniferous trees. Journ. For. 55: 647—650.

Aitolahti, M. 1969. Juuriston ja puuston tunnusten välisistä riippuvuussuhteista ojitettujen soitten kuusikoissa. Comm. Inst. For. Fenn. 68. 2.

Barney, C. W. 1951. Effects of soil temperature and light intensity on root growth of loblolly pine seedlings. Plant Physiol. 26: 146—163.

Batalov, V. V. 1958. Konservatsiya kornei pervichnogo stroyeniya v techeniye zimy. Bot. Zhurn. N:o 6.

Bibelriether, H. 1963. Zur Frage der Wurzelentwicklung von Kiefern auf Sand- und auf Pseudogley. Forstwiss. Cbl. 82. 5/6.

—»— 1964. Unterschiedliche Wurzelbildung bei Kiefern verschiedener Provenienz. Forstwiss. Cbl. 83. 5/6: 129—140.

Crawford, R. M. M. ja Tyler, P. D. 1969. Organic acid metabolism in relation to flooding tolerance in roots. Journ. Ecol. 57: 235—244.

Elgabaly, M. ja Elghamry, W. 1970. Air permeability as related to particle size and bulk density in sand systems. Soil Sci. 1: 22—29.

Elonen, P. 1971. Particle-size analysis of soil. Acta Agr. Fenn. 122.

Etholén, K. 1971. Metsänviljelyalojen inventointien tuloksia Lapissa. Metsäntutkimuslaitos. Rovaniemen tutkimusaseman tiedonantoja N:o 2: 1—11.

Gael, A. G., Brysova, L. P., Kamenetskaya, I. V., Olovjannikova, I. N., Rafes, P. M. ja Petrenko, E. E. 1962. Lesorastitelnye usloviya lentochnykh borov Priirtyshya. Trudy Laboratorii lesovedeniya AN SSSR, 4.

Gael, A. G. ja Voronkov, N. A. 1965. Kornevaya sistema sosny Pinus silvestris L. na peschanykh pochvakh Kazakhstana i Dona. Bot. Zhurn. 50.4.

Heikurainen, L. 1955. Rämemännikön juuriston rakenne ja kuivatuksen vaikutus siihen. Acta For. Fenn. 65.3.

Herzt, M. 1935. Kuusen juuriston ensikehityksestä. Acta For. Fenn. 41.3.

Hidding, A. ja van der Berg, C. 1960. The relation between pore volume and the formation of root systems in soils with sandy layers. Transactions of 7th Intern. Congr. of Soil Sci. 369—373.

Hosner, J. F. ja Leaf, A. L. 1962. The effect of soil saturation upon the dry weight, ash content and nutrient absorption of various bottomland tree seedlings. Proc. Soil Sci. Soc. Amer. 26: 401—404.

Iljinski, V. V. 1964. Moshtshnost korneobitayemogo sloya b sosnovykh nasazhdeniyakh razlichnykh klassov boniteta. Lesn. Zhurn. N:o 5.

Kalela, E. 1949. Männiköiden ja kuusikoiden juuristosuhteista. Acta For. Fenn. 57.2.

Kaufman, C. M. 1945. Root growth of jack pine on several sites in the Cloquet Forest, Minnesota. Ecology 26: 10—23.

Kokkonen, P. 1923. Beobachtungen über das Wurzelsystem der Kiefer in Moorböden. Acta For. Fenn. 25.11.

Kolesnikov, B. P. 1945. Obyknovennaya sosna na yugo-vostochnoi granitse svoego areala. Byull. MOIP. 50. vyp. 5/6.

Kramer, P. 1951. Causes of injury to plants resulting from flooding of the soil. Plant Physiol. 26: 722—736.

Kreutzer, K. 1961. Wurzelbildung junger Waldbäume auf Pseudogleyböden. Forstwiss. Cbl. 80. 11/12: 356—392.

Kuusela, K. ja Salovaara, A. 1971. Kainuun, Pohjois-Pohjanmaan, Koillis-Suomen ja Lapin metsävarat vuosina 1969—70. Folia For. 110.

Köstler, J., Brücner, E. ja Bibelriether, H. 1968. Die Wurzeln der Waldbäume. Hamburg.

Ladefoged, K. 1939. Untersuchungen über die Periodizität der Wurzeln im Ausbruch und Längenwachstum bei einigen unserer gewöhnligsten Waldbäume. Kopenhagen.

Laitakari, E. 1927. Männyn juuristo, morfologinen tutkimus. Acta For. Fenn. 33.1.

Lehtinen, E. 1967. Tienrakennuksen tiivistystarkkailumenetelmiä. Valtion teknillinen tutkimuslaitos. Tiedotus. Sarja III — Rakennus III.

Leibundgut, H., Dafis, S. ja Richards, F. 1963. Untersuchungen über das Wurzelwachstum verschiedener Baumarten. Schweiz. Z. Forstw. 114: 621—646.

Leyton, L. 1956. Aeration and root growth in tree seedlings. 12th Congr. Int. Union For. Res. Organ. Oxford No IUFRO 56/21/5.

—»— ja Rousseau, L. Z. 1957. Root growth of tree seedlings in relation to aeration. The physiology of forest trees. Ronald Press, New York.

Lobanov, N. V. 1949. Mikoriznyi tip pitaniya lesnyh derevjev. Lesnoye hozyaistvo N:o 1.

Lyr, H. ja Hoffmann, G. 1967. Growth and growth periodicity of tree roots. Intern. Rev. of For. Res. 2: 181—236.

Lähde, E. 1966. Studies on the respiration rate in the different parts of the root systems of pine and spruce seedlings and its variations during the growing season. Acta For. Fenn. 81.8.

—»— 1969. Biological activity in some natural and drained peat soils with special reference to oxidation-reduction conditions. Acta For. Fenn. 94.

—»— 1970. Vihreitä ajatuksia metsänviljelystä. Metsä ja Puu n:o 11.

—»— 1971. Maan fysikaaliset ominaisuudet ja männyn taimistojen kehitys Pohjois-Suomessa. Metsäntutkimuslaitos. Rovaniemen tutkimusaseman tiedonantoja N:o 2: 16—26.

Norokorpi, Y. 1971. Männyn viljelytaimistojen tuhoista Pohjois-Suomessa. Metsäntutkimuslaitos. Rovaniemen tutkimusaseman tiedonantoja N:o 2: 37—49.

Orlov, A. J. ja Koshelkov, S. P. 1971. Pochvennaya ekologiya sosny. Moskva.

Paavilainen, E. 1966. Maan vesitalouden järjestelyn vaikutuksesta rämemännikön juurisuhteisiin. Comm. Inst. For. Fenn. 61.1.

Pohtila, E. 1970. Aurattujen alojen metsänviljelymenetelmä. Metsä ja Puu n:o 2.

—»— 1972. Tutkimuksia aurattujen alueiden metsänviljelymenetelmistä Koillis-Suomessa. Tulokset vuosina 1967—68 tehdyistä männyn kylvö- ja istutuskokeista. Helsingin yliopiston Metsänhoitotieteen laitos. Tiedonantoja N:o 6.

Rakhteyenko, I. N., Kochanovski, S. B. ja Krot, L. A. 1962. O prodolzhitelnosti zhizni fiziologicheski aktivnykh kornei drevesnykh porod. Sb. Fiziologiya i biokhimiya rastenii. Minsk.

Roze, E. 1937. Priezu un eglu stadu dzinumsaknu garuma pieaugsnas gaita. Rep. Latv. For. Res. Sta. 7: 1—76.

Schmidt-Vogt, H. 1971. Wachstum und Wurzelentwicklung von Schwarzerlen verschiedener Herkunft. Allgemeine Forst- und Jagdzeitung 6: 149—155.

Shimanjuk, A. P. 1950. Stroyeniye kornevykh sistem sosny v lesakh Podmoskovya. Trudy In-ta lesa AN SSSR, 3.

Solin, P. 1970. Männyn istutuksen antamista tuloksista Lapin piirimetsälautakunnan alueen eteläosissa. Helsingin yliopiston Metsänhoitotieteen laitos. Tiedonantoja N:o 3.

Tyrtikov, A. P. 1954. Rost kornei derevyev v dlinu na severnom predele lesov. Byull. MOIP, t. 59. Otd. biol. vyp. 1.

Utkin, A. I. 1958. Nekotoryye osobennosti rasprostraneniya kornebykh sistem drevesnykh porod v holodnykh pochvakh. Soobshtsh. In-ta lesa AN SSSR, vyp. 9.

Valtanen, J. 1969. Uusia ajatuksia metsänviljelystä. Hyvä taimi ja sen tuottaminen Pohjois-Suomessa. Metsä ja Puu n:o 12.

—»— 1970 a. Lapin männyntaimistojen kunnosta. Metsä ja Puu n:o 4.

—»— 1970 b. Versosyöpä Lapin taimistojen kimpussa. Metsä ja Puu n:o 4.

Viro, P. J. 1952. Kivisyyden määrittämisestä. Comm. Inst. For. Fenn. 40.3.

Vomperski, S. E. 1968. Biologicheskiye osnovy effektivnosti lesoosusheniya. Moskva.

Vostrikov, A. P. 1940. Nekotoryye dannye o kornevoi sisteme sosny. Trudy Bryanskogo lesokhozyaistv. in-ta, 4.

Wagenknecht, E. 1955. Wurtzeluntersuchungen und ihre Bedeutung für standortgerechten Waldbau. Arch. für Forstw. 5/6: 397—406.

Wibeck, E. 1923. Om missbilding av tallens rotsystem vid spettplanting. Medd. från Stat. Skogsförsöksanst. 20: 261—303.

Zak, B. 1961. Aeration and other soil factors affecting Southern Pines as related to littleleaf disease. Tech. Bull. U.S. Dep. Agr. No. 1248.

The structure of the root system and the condition of the pine *(Pinus silvestris L.)* seedlings in northern Finland

SUMMARY

This study is a part of the investigation of the environment of pine seedlings in northern Finland. The material is taken from experimental plots in the regions of west and east Lapland. The division into regions is based on the land area divisions adopted by the research team for the so-called »core research» project. The area is delineated by N 66° and N 68°. A total of 47 experimental plots, containing a total of 574 seedlings, were investigated. The structure and development of sowed, planted and volunteer seedlings of different conditions on different sites were studied. The depth of the central root system, the number of long roots, and the number of short roots on the long roots were measured or counted on seedlings 30—150 cm high. The structure and extent of the root system were also compared by applying a so-called root index (p. 10).

The structure of the planted seedlings clearly differed from that of sowed and volunteer seedlings, which appeared to depend on the method of planting and on the poor physical condition of the soil including cold, excess water with associated lack of oxygen, and possibly also on the southern provenance of the material used for reforestation. The greatest differences between the planted seedlings compared to the others were the lack or bending of the main root and the shallowness of the root system. The number of long roots was greater for the sowed and volunteer seedlings than for the planted ones of the same height. The poorer the condition of the seedling, the more reduced was the branching of the roots. Seedlings which were dead or in poor condition had a larger root collar diameter than seedlings classified as being in good condition, an observation which probably indicated a distrubance of the interaction between root and stem in the former seedlings. Enlargements visible with the naked eye were common on planted seedlings and on some sowed seedlings and were found primarily on some sowed seedlings and were found primarily on seedlings from a decidedly more southern provenance than that of the reforestation site.

On the sites with over 100 cm tall seedlings, the fine, impermeable fraction of the soil composition was decidedly larger, to a depth of at least 30 cm, than on the sites with seedlings in good condition. This height class is in good agreement with the common observation that the most serious calamities of pine regerations occur in northern Finland in those where the seedlings have reached the snow level. Corresponding calamities do not occur in naturally originated regenerations.

CHEMICAL CONTROL OF SPURCE CONE INSECTS IN SEED ORCHARDS

ERKKI ANNILA

KUUSEN KÄPY- JA SIEMENTUHOLAISTEN KEMIALLISESTA TORJUNNASTA SIEMENVILJELMILLÄ

Suomenkielinen selostus

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0073-0

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

CONTENTS

	Page
1. Introduction	5
2. Materials and methods	5
3. Results	7
3.1. Cone insects	7
3.1.1. Laspeyresia strobilella	7
3.1.2. Dioryctria abietella	7
3.1.3. Hylemyia anthracina	11
3.1.4. Eupithecia sp.	11
3.2. Seed-destroying insects	12
3.2.1. Plemeliella abietina	12
3.2.2. Megastigmus strobilobius	14
3.3. Seeds	16
4. Discussion	18
References	21
Suomenkielinen selostus	24

1. INTRODUCTION

Every year insects do considerable damage to spruce seed crops (Trägårdh 1917, Kangas 1940, Rummukainen 1960). Some insects also damage pine cones (Trägårdh 1917). Forest control of these insects was earlier considered uneconomic. But with the production of conifer seed in orchards, interest in the control of cone- and seed-destroying insects has revived (Bakke 1969, Merkel 1969, Yates & Lewis 1969).

There are several reasons why control of cone and seed pests is considered economic in seed orchards. First, considerable expense is involved in establishing and maintaining such orchards. Secondly, the trees are planted in rows, which facilitates mechanical treatment, and they produce seed at a comparatively young age, when the cone-bearing crowns are readily accessible. Thirdly, seed orchards probably provide many insects with conditions that, in climatic respects, are more favorable for reproduction, making their occurrence in greater numbers than in forests highly probable. In these respects, seed orchards are fully comparable with fruit tree orchards, where insecticides are sprayed several times during each growing season.

The main purpose of this study was to determine the extent to which insects destroying spruce cones and seeds can be chemically controlled and whether the pesticides affect seed quality. Because insects lay their eggs in cones at remarkably different times, the second goal of the study was to find the best time for application, in the hope that only a single treatment would be needed.

2. MATERIALS AND METHODS

This paper reports the results of experiments conducted during the years 1969—1971 at the Ruotsinkylä experimental area in Tuusula, southern Finland. Because the grafted trees in the seed orchards still produced cones

in rather limited numbers, tests were made on a spruce stand about 40 years old. The insecticides used in this study were originally DDT and two systemic insecticides, dimethoate and oxydemetonmethyl (Metasystox-R), but because the use of DDT was drastically restricted in Finland in 1969, this was replaced in 1970—1971 by lindane. Female flowers and cones were sprayed with insecticides as follows: at the time of flowering (4 June 1969; 6 June 1970), when the conelets turned down (15 June 1970) and when the cones had reached nearly their full size (18 June 1971). Cones were sprayed only once. Insecticide concentration at the time of flowering were as follows: DDT and lindane 0.2 per cent, dimethoate and oxydemetonmethyl 0.1 per cent of active ingredient. Because it is probable that insecticides penetrate into the interior of a closed cone less well than into an open female flower, higher concentrations were used after the flowering period: 15 June 1970 lindane 0.4 per cent, dimethoate and oxydemetonmethyl 0.2 per cent; 18 June 1971 lindane 0.5 per cent, dimethoate and oxydemetonmethyl 0.4 per cent of active ingredient.

In 1969, spruces began to flower in early June, so that female flowers were treated at the start of the flowering period, but in 1970, flowering began in late May, and thus the first application (6 June) was made toward the end of the flowering period. When the second application (15 June) was made the same year, the conelets had already been closed for more than a week. In 1971, the cones were sprayed about three weeks after flowering.

Because there are considerable differences between trees in seed crop quality (Andersson 1965) as well as in the occurrence of certain cone insects (Annila 1966), tests were made with all insecticides on the same tree. Unsprayed control samples were also taken from the same trees. Treatments were made on branches bearing 10 to 20 cones. A danger inherent in this method is that systemic insecticides may be translocated from one branch to another. In tests on Douglas-fir, however, Hedlin (1966) and Johnson & Zingg (1967) have found that such translocation does not take place. On the other hand, insecticides move from the foliage into the cones (Johnson & Zingg 1967). All chemicals were applied with a small hand-sprayer (cf. Rummukainen & Tanskanen 1969).

Cones were collected in the latter part of August and were stored at —18° C for closer examination. In the laboratory, the cones were carefully searched for the larvae of various cone insects. The number of seed-destroying larvae and empty seeds was estimated by dissecting about 30 seeds from each cone.

The original plan was that in 1969 and 1970, at least 10 spruces could be obtained for each treatment to be included in the final material and at least 10 cones from each tree for each series. Therefore, control tests were first made on 15 trees. In 1971, the plan was to obtain 5 trees with each treatment for the final material. By the autumn, however, squirrels and

crossbills had destroyed a considerable proportion of the cones, especially those that had been treated with the various insecticides.

The final quantities of material are shown in Table I.

3. RESULTS

3.1. Cone insects

3.1.1. *Laspeyresia strobilella* L.

The most injurious spruce cone insect is no dobt *Laspeyresia strobilella*. Two *Laspeyresia* species feed on spruce cones, *L. strobilella* and *L. illutana* H.S. This study is concerned only with the former, since *L. illutana* larvae were found in very small numbers, probably because, by the time the samples were collected, the larvae had already left the cones to overwinter in the soil. *L. strobilella* larvae, on the other hand, hibernate in the cones. Table II shows the numbers of larvae per cone found after treatment with the various insecticides. When treatment was applied during the flowering period, all the insecticides were effective; the number of larvae was smallest in the cones treated with dimethoate. When treatment took place after the flowering period, dimethoate was the only chemical that clearly reduced the number of larvae. Lindane, when applied as a spray after cone closing, did not reduce the infestation, which is quite understandable in view of the life habits of *L. strobilella* larvae. They live exclusively inside the cones and are not exposed to insecticides on the surface. The systemic insecticide dimethoate, in contrast, penetrates quite well into the interior of cones, killing the larvae there.

3.1.2. *Dioryctria abietella* Schiff.

Dioryctria abietella is another highly destructive insect whose larvae eat the seeds as well as the scales of spruce cones. The adults fly in midsummer and lay their eggs in the cones (S a a l a s 1949). In late autumn, the larvae drop to the ground to overwinter. Table III shows the impact of various insecticides on the numbers of *D. abietella* larvae. All insecticides sprayed during and after the flowering period clearly reduced the numbers of larvae. It is interesting to compare the numbers of *Laspeyresia strobilella* and *D. abietella* larvae that survived when the various insecticides were applied after the cones had closed. As pointed out earlier only dimethoate significantly reduced the number of *L. strobilella* larvae. The number of *Dioryctria* larvae, on the other hand, was considerable reduced by lindane

Table I. Number of trees, cones and seeds in various treatments.

Treatment	Date of treatment												Total		
	4 June 1969			6 June 1970			15 June 1970			18 June 1971					
	Number of			Number of			Number of			Number of			Number of		
	trees	cones	seeds	trees	cones	seeds	trees	cones	seeds	trees	cones	seeds	trees	cones	seeds
DDT	7	64	1 613	—	—	—	—	—	—	—	—	—	7	64	1 613
Lindane	—	—	—	5	42	1 957	5	63	2 780	5	87	2 025	15	192	6 762
Oxydemetonmethyl	7	76	2 004	10	78	3 594	8	73	3 266	5	79	1 881	30	306	10 745
Dimethoate	8	70	1 757	10	77	3 461	6	52	2 453	4	76	2 275	28	275	9 946
Untreated	8	83	2 078	11	104	4 574	—	—	—	5	79	1 622	24	266	8 274
Total	8	293	7 452	11	301	13 586	8	188	8 499	5	321	7 803	32	1 103	37 340

Table II. Number of larvae of *Laspeyresia strobilella* per cone in cones treated with various insecticides.

Treatment during the flowering period

on 4 June 1969

Tree no.	Treatment			
	DDT	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
1	1.21	0.14	0.00	1.29
2	3.83	0.00	0.78	1.75
3	1.50	0.13	0.00	1.15
4	0.14	0.47	0.00	1.08
5	2.00	0.00	0.00	3.80
6	0.40	0.30	0.20	1.44
7	—	0.30	0.00	0.50
8	0.89	—	0.00	1.46
Mean	1.13	0.19	0.13	1.40

on 6 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
11	—	2.00	0.00	1.88
12	1.44	0.60	0.00	1.30
13	—	1.00	0.00	1.38
14	0.00	0.60	0.14	1.50
15	—	1.60	0.20	3.60
17	3.50	5.10	0.25	4.90
18	2.10	0.70	0.00	1.40
19	—	0.60	0.11	2.60
20	—	0.33	0.00	1.20
21	0.75	0.15	0.00	1.20
Mean	1.45	1.42	0.08	2.10

Treatment after the flowering period

on 15 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
11	5.00	1.88	—	1.88
12	1.70	2.10	0.10	1.30
15	4.10	3.40	—	3.60
16	1.10	1.40	0.00	1.80
17	5.00	3.60	1.75	4.90
18	1.00	1.00	0.00	1.40
20	0.75	1.30	0.00	1.20
21	1.10	1.60	0.00	1.20
Mean	1.98	2.08	0.29	2.17

on 18 June 1971

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
31	2.80	1.68	0.00	3.20
32	1.29	3.33	—	3.50
33	3.71	0.80	0.00	4.15
34	5.00	2.71	0.00	3.57
35	8.30	4.20	0.00	7.15
Mean	4.64	2.38	0.00	4.54

Table III. Number of larvae of *Dioryctria abietella* per cone in spruce cones treated with various insecticides.

Treatment during the flowering period

on 4 June 1969

Tree no.	Treatment			
	DDT	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
1	0.00	0.00	0.00	0.00
2	0.17	0.00	0.00	0.38
3	0.00	0.00	0.00	0.31
4	0.00	0.07	0.00	0.08
5	0.00	0.00	0.00	1.80
6	0.00	0.00	0.00	0.90
7	—	0.00	0.00	0.25
8	0.00	—	0.00	0.23
Mean	0.02	0.01	0.00	0.39

on 6 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
11	—	0.00	0.00	0.50
12	0.11	0.00	0.00	0.40
13	—	0.00	0.00	0.38
14	0.00	0.00	0.00	0.00
15	—	0.00	0.00	0.30
17	0.00	0.10	0.00	0.10
18	0.10	0.00	0.10	0.40
19	—	0.10	0.00	0.10
20	—	0.00	0.00	0.10
21	0.00	0.00	0.00	0.50
Mean	0.05	0.03	0.01	0.31

Treatment after the flowering period

on 15 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
11	0.00	0.00	—	0.00
12	0.00	0.10	0.00	0.00
15	0.00	0.00	—	0.30
16	0.00	0.80	0.00	1.30
17	0.00	0.00	0.00	0.00
18	0.00	0.20	0.10	0.70
20	0.13	0.10	0.00	0.10
21	0.00	0.00	0.00	0.00
Mean	0.02	0.11	0.02	0.31

on 18 June 1971

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Number of larvae per cone			
31	0.00	0.00	0.00	0.87
32	0.29	0.33	—	0.20
33	0.00	0.00	0.00	0.15
34	0.05	0.35	0.00	0.21
35	0.00	0.05	0.00	0.00
Mean	0.03	0.10	0.00	0.27

also. The difference is explained by the different life habits of the larvae. *L. strobilella* larvae live inside the cones, feeding mainly on the seeds, while *D. abietella* larvae also feed on the scales and move about to some extent on the cone surface. Thus it is understandable that *L. strobilella* larvae are only exposed to insecticides that penetrate into the interior of the cones. *D. abietella* larvae, on the other hand, are also exposed to insecticides on the surface of the cones. It seems probable, therefore, that only dimethoate, a systemic insecticide, reaches the cone interiors in adequate amounts, while lindane remains on the surface.

3.1.3. *Hylemyia anthracina* Czerny

H. anthracina lays its eggs in the female flowers (S a a l a s 1949), and the larvae develop very rapidly. As early as mid-June, almost full-sized larvae were found in the cones in connection with spraying. Because the larvae leave the cones during July (S a a l a s 1949, R u m m u k a i n e n 1960), they were, naturally, not found in the cones at the time of collection, but cones damaged by the larvae of this fly are readily identifiable on account of their curved shape and resin flow. Table IV indicates the percentage of cones damaged by the larvae. Treatments made after the flowering period were excluded from the table, because the effects of the larvae were already so evident that many of the cones had to be classified as damaged. All treatments applied during the flowering period decisively reduced the numbers of larvae. This was evidently in part due to the fact that as the larvae develop very rapidly, the activity of the insectisides had not yet dissipated.

3.1.4. *Eupithecia* sp.

Two *Eupithecia* species feed on spruce cones, *E. bilunulata* Zett. and *E. pini* Retz. Only a few larvae of these species were found in the material and so no statistical treatment of the effects of the various insecticides on their numbers can be presented. Obviously, the small number of larvae was in part due to the fact that they had left the cones before these were collected (cf. S a a l a s 1949).

Table IV. Percentage of cones damaged by larvae of *Hylemyia anthracina* in samples treated with various insecticides.

Treatment during the flowering period

on 4 June 1969

Tree no.	Treatment			
	DDT	Meta-systox	Dimeth-oate	Un-treated
	Percentage of cones damaged			
1	0.0	0.0	0.0	14.3
2	0.0	0.0	0.0	0.0
3	0.0	0.0	0.0	7.7
4	0.0	0.0	0.0	0.0
5	0.0	0.0	0.0	0.0
6	0.0	0.0	0.0	33.3
7	—	0.0	0.0	50.0
8	0.0	—	0.0	0.0
Mean	0.0	0.0	0.0	11.9

on 6 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Meta-systox	Dimeth-oate	Un-treated
	Percentage of cones damaged			
11	—	0.0	0.0	50.0
12	0.0	0.0	0.0	40.0
13	—	50.0	11.1	37.5
14	11.1	30.0	0.0	0.0
15	—	0.0	20.0	30.0
17	0.0	0.0	0.0	10.0
18	0.0	0.0	0.0	40.0
19	—	0.0	0.0	40.0
20	—	0.0	0.0	10.0
21	0.0	16.7	10.0	50.0
Mean	2.8	7.7	5.2	32.7

3.2. Seed-destroying insects

3.2.1. *Plemeliella abietina* Seitn.

Plemeliella abietina lays its eggs in the female flowers during the flowering period (A n n i l a 1966). The larvae hollow out the seeds during the summer and overwinter inside them. Table V shows the percentage of seeds destroyed by this insect in the various treatments. In 1969, the pest was fairly widespread (22.6 % of the seeds). It may be mentioned by way of comparison that in crossing experiments on spruce conducted by the department of forest genetics in the same forest stand, *Plemeliella* larvae were found to have destroyed 20.5 per cent of the seeds. In 1970 and 1971, on the other hand, this, species was much less widespread. Dimethoate treatment during the flowering period clearly reduced the number of larvae. DDT and lindane, on the other hand, had no discernible effect. Apparently, these two insecticides had not reached the ovules in sufficient amounts. This is easy to understand, since, despite the openness of the female flowers, the ovules are well protected. After flowering, only dimethoate reduced the number of larvae significantly.

Table V. Percentage of seeds damaged by the larvae of *Plemeliella abietina* in spruce cones treated with various insecticides.

Treatment during the flowering period

on 4 June 1969

Tree no.	Treatment			
	DDT	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
1	43.4	5.4	0.0	36.2
2	57.0	7.0	7.5	25.5
3	7.0	0.3	0.0	7.0
4	5.7	0.7	0.3	11.8
5	12.0	0.0	0.0	35.0
6	28.9	0.7	4.8	28.5
7	—	2.0	0.0	18.2
8	29.3	—	0.0	28.2
Mean	26.5	2.2	1.7	24.6
t	3.14	21.18*	20.88*	

on 6 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
11	—	2.3	0.7	5.0
12	1.7	1.9	0.0	4.7
13	—	2.1	0.0	3.3
14	3.1	2.7	2.6	6.9
15	—	0.0	0.9	0.5
17	8.6	10.0	0.5	6.9
18	3.1	2.7	1.0	3.7
19	—	17.1	1.1	17.5
20	—	3.8	1.0	4.9
21	3.1	2.6	0.0	2.4
Mean	3.6	5.0	0.8	5.4
t	2.48	1.06	11.97*	

Treatment after the flowering period

on 15 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
11	1.9	3.2	—	5.0
12	0.4	1.0	0.9	4.7
15	0.9	1.6	—	0.5
16	3.7	4.4	4.0	7.0
17	6.3	4.1	7.7	6.9
18	5.1	5.6	0.8	3.7
20	4.2	3.8	1.5	4.9
21	2.1	3.9	1.1	2.4
Mean	2.9	3.4	2.3	4.4
t	3.86*	2.79	5.96*	

on 18 June 1971

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
31	13.0	9.1	0.0	14.0
32	2.0	1.7	—	2.0
33	1.4	3.2	0.0	1.5
34	3.6	1.7	0.0	2.3
35	7.7	4.9	0.0	8.4
Mean	6.3	4.7	0.0	5.2
t	2.29	1.00	11.17*	

* $P < 0.001$

3.2.2. *Megastigmus strobilobius* Ratz.

Megastigmus strobilobius deposits its eggs in the seeds towards the end of June, when the cones are almost full-sized (Escherich 1942). The larvae hollow out the seeds and overwinter inside them. This species was relatively more widespread in 1969 than in the two following years. In connection with crossing experiments it was found that 20 per cent of the seeds had been destroyed by this insect.

DDT and lindane do not seem to have had a great impact on the number of larvae (Table VI). On the other hand, dimethoate and oxydemetonmethyl clearly increased the number of *Megastigmus* larvae. This apparently paradoxical result suggests that after systemic insecticides had killed *Plemeliella abietina* larvae (Table V), *M. strobilobius* deposited its eggs in greater numbers in these cones than in those (control) that were still infested with *Plemeliella abietina* larvae. In a comparison of Tables V and VI, it can be noted that the smaller the number of *Plemeliella abietina* larvae, the larger the number of *M. strobilobius* larvae. Although larvae of these species are usually found in small numbers in spruce seed, they may occur in remarkably large numbers in some years and particularly in some trees (Madziara-Borusiewicz 1963, Annila 1966.) In crossing experiments conducted in the same forest stand, it was found that, in 1969, these insects had destroyed an average of 38 per cent of the seeds, and in some trees more than 60 per cent (the material included 30 trees and 6 378 seeds) although in that year cone crops were more than usually abundant. These observations suggest that the species in question may sometimes have to compete for nutriment.

In 1971, larvae of this insect were so scarce that no conclusions can be drawn about the effects of the various insecticides.

Table VII shows the percentages by which the various insecticides reduced the numbers of larvae of the various cone and seed insects. *D. abietella* and *H. anthracina* are not difficult to control. The reason for this is clearly in part that the larvae of these species are much more mobile than the other larvae that attack cones and so tend to come in contact with insecticides. On the other hand, *M. strobilobius* larvae are more difficult to control, evidently because systemic insecticides do not readily penetrate into the interior of the seeds. The larvae of this species can be controlled successfully with higher concentrations of insecticides.

Table VI. Percentage of seeds damaged by larvae of *Megastigmus strobilobius* in spruce cones treated with various insecticides.

Treatment during the flowering period

on 4 June 1969

Tree no.	Treatment			
	DDT	Oxydemeton-methyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
1	51.7	22.3	5.4	8.6
2	17.4	54.0	39.8	21.4
3	1.2	5.1	9.3	1.3
4	0.6	0.0	1.2	0.0
5	0.0	12.4	2.0	0.0
6	3.2	24.9	20.9	12.3
7	—	7.6	16.8	10.2
8	4.0	—	21.6	5.0
Mean	4.3	15.4	14.3	7.4
t	4.25*	12.69*	11.50*	

on 6 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemeton-methyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
11	—	0.0	5.0	2.2
12	0.2	0.2	2.6	0.0
13	—	4.3	0.0	2.3
14	3.4	1.2	0.9	1.2
15	—	1.2	1.5	0.0
17	8.3	5.5	15.3	5.0
18	0.0	0.0	2.0	0.4
19	—	10.9	40.3	3.0
20	—	4.1	4.4	1.5
21	5.1	1.8	13.4	7.7
Mean	2.9	3.1	9.4	2.5
t	0.51	2.30	28.47*	

Treatment after the flowering period

on 15 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemeton-methyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
11	1.9	2.9	—	2.2
12	0.2	0.2	0.7	0.0
15	1.1	2.1	—	0.0
16	1.1	0.4	7.5	2.6
17	6.3	14.5	18.5	5.0
18	0.0	0.2	0.8	0.4
20	1.3	0.9	1.5	1.5
21	4.0	8.3	12.7	7.7
Mean	1.7	4.3	6.4	2.6
t	2.98	6.10*	9.87*	

on 18 June 1971

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemeton-methyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of seeds damaged			
31	0.0	0.0	0.0	0.9
32	0.0	0.0	—	0.7
33	0.0	0.0	0.0	0.0
34	0.0	0.0	0.0	0.9
35	0.0	0.0	0.0	0.0
Mean	0.0	0.0	0.0	0.4

* $P < 0.001$

Table VII. Effectiveness of insecticides for control of cone and seed insects in *Picea abies*.

Date of treatment	Treatment	Insect				
		L. strobilella	D. abietella	P. anthracina	P. abietina	M. strobilobius
		Reduction in number of larvae, %				
4 June 1969	DDT 0.2 %	19.3	94.9	100.0	0.0	41.9
	Oxydemetonmethyl 0.1 %	86.4	97.4	100.0	91.1	0.0
	Dimethoate 0.1 %	90.7	100.0	100.0	93.1	0.0
6 June 1970	Lindane 0.2 %	31.0	83.9	93.5	33.3	0.0
	Oxydemetonmethyl 0.1 %	32.4	90.3	74.2	7.4	0.0
	Dimethoate 0.1 %	96.2	96.8	83.9	85.2	0.0
15 June 1970	Lindane 0.4 %	8.8	93.5	—	34.1	34.6
	Oxydemetonmethyl 0.2 %	4.1	64.5	—	22.7	0.0
	Dimethoate 0.2 %	86.6	93.5	—	47.7	0.0
18 June 1971	Lindane 0.5 %	0.0	88.9	—	0.0	—
	Oxydemetonmethyl 0.4 %	47.6	64.0	—	9.6	—
	Dimethoate 0.4 %	100.0	100.0	—	100.0	—

3.3. Seeds

With all insecticides the number of empty seeds rose significantly when treatment was applied during the flowering period or within a week of its ending (Table VIII). Treatments made three weeks after the flowering period caused only a minor deterioration of seed quality.

Table VIII. Percentage of empty seeds in spruce cones treated with various insecticides.

Treatment during the flowering period

on 4 June 1969

Tree no.	Treatment			
	DDT	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of empty seeds			
1	86.6	89.7	77.1	72.1
2	54.6	71.8	65.5	52.9
3	39.7	49.4	52.2	46.4
4	60.4	62.0	52.5	45.5
5	45.5	56.5	53.1	35.4
6	42.0	66.1	70.3	50.5
7	—	75.3	56.7	45.2
8	65.3	—	76.2	52.0
Mean	57.8	66.1	64.5	50.0
t	5.21*	13.09*	11.15*	

on 6 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of empty seeds			
11	—	47.1	72.7	63.0
12	53.6	62.8	32.4	45.5
13	—	50.0	60.7	39.8
14	70.0	66.6	67.2	64.8
15	—	59.0	67.5	55.0
17	42.1	40.8	36.5	28.3
18	60.3	63.2	74.9	66.4
19	—	61.4	58.7	50.0
20	—	53.7	62.8	42.7
Mean	61.4	60.1	62.5	49.8
t	8.30*	11.84*	14.16*	

Treatment after the flowering period

on 15 June 1970

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of empty seeds			
11	40.4	44.7	—	63.0
12	58.2	47.8	56.1	45.5
15	67.1	56.0	—	55.0
16	28.0	22.7	37.1	40.4
17	43.3	43.7	45.0	28.3
18	76.2	75.8	64.5	66.4
20	43.5	40.0	61.9	42.7
21	55.9	68.5	87.3	54.2
Mean	54.9	51.4	61.5	49.4
t	5.67*	2.19	13.90*	

on 18 June 1971

Tree no.	Treatment			
	Lindane	Oxydemetonmethyl	Dimethoate	Untreated
	Percentage of empty seeds			
31	42.7	63.7	53.9	61.9
32	54.9	31.0	—	31.2
33	30.2	25.0	35.3	24.5
34	47.4	50.6	47.0	52.6
35	26.4	31.1	22.0	27.8
Mean	38.1	41.5	39.7	36.2
t	1.78	4.78*	2.36	

* $P < 0.001$

4. DISCUSSION

Numerous studies have been published since the beginning of this century on the biology of cone- and seed-destroying insects of many conifers (Seitner 1908, 1916, Trägårdh 1917, Holste 1922, Spessivtseff 1924, Bakke 1963, etc:) but full-scale investigations into the control of these insects have been made only since the 1960s, although the insects cause considerable seed losses annually. Studies on the control of cone- and seed-destroying insects are concentrated exclusively on chemical control. Two primary methods used for insecticide application are spraying and trunk implantation. The latter method can hardly be used on a large scale in seed orchards because holes bored in the trunks may injure the trees.

In several studies, Hedlin, Johnson and Buffam have demonstrated (Hedlin 1962, 1964, 1966, Johnson 1962, 1963, Johnson & Rediske 1964, Johnson & Meso 1966, Buffam & Johnson 1966, Johnson & Hedlin 1967). that cone- and seed-destroying insects (*Dioryctria abietivorella* Grt., *Barbara colfaxiana* Kft., *Contarinia oregonensis* Foote, *C. washingtonensis* Johnson, *Megastigmus spermotrophus* Wachtl.) of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco) can be controlled effectively with various systemic insecticides such as dimethoate and oxydemetonmethyl (1.2 to 2.0 per cent of active ingredient) and dicrotophos (0.35 to 0.75 per cent). If only one application is made, the best time, in their view, is when the cones have started to turn down. Cone- and seed-destroying insects (*Pegohylemyia* sp., *Laspeyresia* sp., *Megastigmus* sp.) of white spruce (*Picea glauca* (Moench) Voss) have also been controlled successfully with the systemic insecticides (dimethoate and oxydemeton-methyl 0.5 to 1.0 per cent, dicrotophos 0.5 per cent) (Anon. 1969, Hedlin 1973). Stadnitsky et al. (1972) obtained good control of *Pegohylemyia anthracina* and *Laspeyresia strobilella* with insecticides applied by helicopter.

Pissodes validirostris Gyll. and *Dioryctria mendacella* Stgr. are highly destructive to cones of *Pinus pinea* in Spain (Romanyk & Bachiller 1965, Bachiller 1966, Cuevas & Bachiller 1969, 1970). But the damage could be controlled in the stands from which seed was to be collected by dusting the trees with 10 per cent DDT (Romanyk & Bachiller 1965). In the Soviet Union, too, *P. validirostris* adults have been successfully controlled with various chemicals, but these have had no effect on the larvae in the cones (Smetanin 1970). According to Merkel (1969, 1970) and Merkel & DeBarr (1971), damage by cone insects (*Dioryctria* sp., *Laspeyresia anaranjada* Miller) of *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliottii* can largely be prevented by trunk implantation of systemic insecticides (dimethoate, oxydemetonmethyl, dicrotophos). Cone

insects of *Araucaria cunninghamii* Sweet have been controlled by the same method (Heather 1970).

In several studies, attention has been focused on the possible phytotoxic effect of various insecticides. Attention has primarily centered on changes in the color of the needles and seed germination. According to Hedlin (1962, 1966), dimethoate, oxydemetonmethyl and dicrotophos cause slight changes in the shape of Douglas-fir needles, their yellowing and falling, as well as the browning of the cone scales. In experiments made by Merkel (1970) and Merkel & Barr (1971), insecticides were not found to have any phytotoxic effect on the color of *P. elliottii* needles, the number of empty seeds or seed germination. According to Ruth and Hedlin (1970), dimethoate and oxydemetonmethyl, for instance, had no effect on the germination of *Picea glauca* or Douglas-fir seeds. In experiments conducted by Johnson & Zingg (1967), dimethoate and oxydemetonmethyl caused some changes in Douglas-fir needles and cones, depending on the concentrations, but they did not impair seed quality. On the other hand, Heather (1970) mentions that dimethoate reduced the germination of *Araucaria* seed.

Laboratory tests by Ritter and Miething (1967) showed that most of the 26 pesticides examined (including lindane and DDT) markedly inhibited germination of spruce and pine pollen even at very low concentrations. According to Braun and Schönbeck (1963, 1965), certain fungicides and acaricides inhibit pollen germination in apple and cherry if the trees are treated during the flowering period. They observed no phytotoxic effects if treatment was applied before flowering. According to Gentile, Gallagher and Santner (1971) and Gentile & Gallagher (1972), DDT and dimethoate, among other pesticides, reduced pollen germination of petunia and tomato and inhibited pollen tube growth. Pollen germination and pollen tube growth are evidently highly vulnerable phases in conifers also (cf. Annila 1966, Sarvas 1968). But the phytotoxicity of insecticides can perhaps be reduced by careful timing, i.e. by applying treatment shortly before the fertilization of the egg nucleus. According to Sarvas (1968), fertilization in spruce generally takes place in late June or early July in southern Finland. At this time, *Hylemyia anthracina* larvae are fairly large and have already caused some damage to cones. However, as the larvae have not yet left the cones (Rummukainen 1960), they can be killed with insecticidal treatment, thus reducing the insect density the following year. *Plemeliella abietina* larvae have also by then apparently damaged the seeds so much that these are no longer viable. But eggs of this insect in a pollen chamber prevent pollen germination almost completely (Annila 1966) and thus cause formation of empty seeds. *Megastigmus strobilobius* lays its eggs in late June and *Dioryctria*

abietella in early July. Thus, late-June treatment is highly suitable for these insects, whereas treatment given during the flowering period increased the number of *Megastigmus strobilobius* larvae (Table VI). In late June *Laspeyresia strobilella* larvae are also still rather small and have caused only insignificant damage.

Contact insecticides (DDT, lindane) are not particularly useful in controlling spruce cone- and seed-destroying insects when the insects to be killed are inside the cones. On the other hand, systemic insecticides can quite well be used for this purpose in seed orchards. Dimethoate is the preferred insecticide on the basis of its effectiveness and its relatively low toxicity to mammals and birds. However, the concentrations of these insecticides must be considerably higher (at least 0.5 per cent of active ingredient) than for ordinary use. Excessive concentrations (more than 1 per cent) should be avoided, because phytotoxicity increases with concentration. The best time for treatment is the latter part of June. Treatment during the flowering period should be avoided, since it is highly probable that many insecticides have a detrimental effect on pollen germination. The efficacy of insecticides can be increased by spraying the foliage of the cone-bearing twigs, too.

REFERENCES

Andersson, E. 1965. Cone and seed studies in Norway spruce (Picea abies (L.) Karst.). — Studia Forestalia Suecica 23: 1—214.

Annila, E. 1966. On the occurrence of *Plemeliella abietina* Seitn. (Dipt., Cecidomyidae) and *Megastigmus strobilobius* Ratz. (Hym., Chalcididae) in Finland. — Ann. Ent. Fenn. 32: 3—11.

Anon. 1969. Preventing insect seed loss in white spruce. — Res. News, Dept. Fish. For. 12 (5).

Bachiller, P. 1966. Estudio sobre la biologia y tratamientos del *Pissodes validirostris* Gyll. — Boll. Servicio Plagas For. 9: 133—136.

Bakke, A. 1963. Studies on the spruce-cone insects *Laspeyresia strobilella* (L.) (Lepidoptera: Tortricidae), *Kaltenbachiola strobi* (Winn.) (Diptera: Itonidae) and their parasites (Hymenoptera) in Norway. — Meddel. Norske Skogsforsøksvesen 19: 1—151.

—»— 1969. Grankonglenes skadeinsekter og frøplantasjene. (Summary: Spruce cone insects and seed orchards). — Tidsskr. Skogbruk 77: 255—263.

Braun, H. von & Schönbeck F. 1963. Untersuchungen über den Einfluss von Pflanzenschutzpräparaten auf die Keimung von Apfel- und Birnenpollen. — Erwerbsobstbau 5: 170—171.

—»— 1965. Untersuchungen über den Einfluss verschiedener Pflanzenschutzpräparate auf die Befruchtung von Apfelbäumen. — Erwerbsobstbau 7: 26—28.

Buffam, P. & Johnson, N. 1966. Test of guthion and dimethoate for douglas-fir cone midge control. — Forest Science 12: 160—163.

Cuevas, P. & Bachiller, P. 1970. Estudio de los insectos que danan la produccion frutera del pino pinonero y metodos utilizados para su combate. — Boll. Servicio Plagas For. 13: 227—231.

Escherich, K. 1942. Die Forstinsekten Mitteleuropas. V. — 746 pp. Berlin.

Gentile, A. G., Gallagher, K. J. & Santner Z. 1971. Effect of some formulated insecticides on pollen germination in tomato and petunia. — J. Econ. Ent. 64: 916—919.

Gentile, A. G., & Gallanger, K. J. 1972. Pollen germinaton and tube elongation in petunia inhibited or reduced by commercial formulations of pesticides in vitro. — J. Econ. Ent. 65: 488—491.

Heather, N. W. 1970. Preliminary trials of systemic insecticides for the protection of hoop pine seed cones. — Austr. For. Res. 4: 27—32.

Hedlin, A. F. 1962. Two systemic insecticides, phosphamidon and systox, used against the douglas-fir cone midge, *Contarinia oregonensis* Foote. — Can. Dept. Forestry, Forest Ent. Pathol. Branch, Bi-monthly Progr. Rep. 18 (1): 3—4.

—»— 1964. Five systemic insecticides used against douglas-fir cone insects. — Can. Dept. Forestry, Forest Ent. Pathol. Branch, Bi-monthly Progr. Rep. 20 (2): 4.

Hedlin, A. F. 1966. Prevention of insect-caused seed loss in douglas-fir with systemic insecticides. — Forestry Chronicle 42: 76—82.

—»— 1973. Spruce cone insects in British Columbia and their control. — Can. Ent. 105: 113—122.

Holste, G. 1922. Fichtenzapfen- und Fichtensamenbewohner Oberbayerns. — Zeitschr. Ang. Ent. 8: 125—160.

Johnson, N. E. 1962. Test of guthion for the control of the douglas-fir midge. — J. Econ. Ent. 55: 615—616.

—»— 1963. Insecticides tested for control of the douglas-fir cone midge. — J. Econ. Ent. 56: 236—237.

Johnson, N. E. & Hedlin, A. F. 1967. Douglas-fir cone insects and their control. — Can. Dept. For. Rur. Devel., Forestry Branch, Dept. Publ. 1168.

Johnson, N. E. & Meso, S. W. 1966. Effectiveness of three systemic insecticides for douglas-fir cone and seed insect control. — Weyerhaeuser Forestry Paper 10.

Johnson, N. E. & Rediske, J. H. 1964. Tests of systemic insecticides for the control of douglas fir cone midge, *Contarinia oregonensis* Foote. — Weyerhaeuser Co. For. Res. Note 56.

Johnson, N. E. & Zingg, J. G. 1967. Effective translocation of four systemic insecticides following application to the foliage and cones of douglas-fir. — J. Econ. Ent. 60: 575—578.

Kangas, E. 1940. Kuusen siemensato ja käpytuhot v. 1937. (Referat: Zapfenschäden und Samenertrag bei der Fichte im J. 1937.) — Comm. Inst. For. Fenn. 29 (2): 1—38.

Madziara-Borusiewicz, K. 1961. Masowy pojaw pryszczarka *Plemeliella abietina* Seitn. (Cec., Dipt.) szkodnika nasion swierka pospolitego (Picea excelsa Lk.) oraz wystapienie jego nowego pasozyta *Anogmus hohenheimensis* (Ratzb.) (Pterom. Hym.). (Referat: Massenerscheinung des Fichtensamenschädlings *Plemeliella abietina* Seitn. (Cecidomyidae. Dipt.) und Auftreten dessen neuen Schmarotzers *Anogmus hohenheimensis* Ratzb. (Pteromalidae, Hym.) — Folia For. Polon. 6: 142—147.

Merkel, E. P. 1969. Insect control in forest tree seed orchards. — J. For. 67: 748—750.

—»— 1970. Trunk-implanted systemic insecticides for slash pine cone insect control. — Florida Ent. 53: 143—146.

Merkel, E. P. & DeBarr, G. L. 1971. Trunk implantation of dicrotophos for cone-insect control in slash pine seed production stands. — J. Econ. Ent. 64: 1295—1298.

Ritter, G. & Miething, E. 1967. Über die Wirkung von Pflanzenschutzmitteln auf die Pollenkeimung bei Kiefer und Fichte. — Arch. Pfl. schutz 3: 131—141.

Romanyk, N. & Bachiller, P. 1965. Excelentes resultados de la campana contra el *Pissodes validirostris* Gyll., plaga de las pinas de *Pinus pinea* L. — Bol. Servicio Plagas For. VIII: 7—14.

Rummukainen, U. 1960. Kuusen siementuhojen runsaudesta ja laadusta. (Referat: Über Reichlichkeit und Art der Samenschäden bei der Fichte.). — Comm. Inst. For. Fenn. 52 (3): 1—83.

Rummukainen, U. & Tanskanen, E. 1969. Vesapistooli ja sen käyttö. (Summary: A new brush-killing tool and its use.) — Folia Forestalia 69: 1—8.

Ruth, D. S. & Hedlin, A. F. 1970. Germination tests on white spruce and douglas-fir seed from cones treated with systemic insecticides. — Bi-monthly Res. Notes 26: 41—42.

Saalas, U. 1949. Suomen metsähyönteiset. — 719 pp. Helsinki.

Sarvas, R. 1968. Investigation on the flowering and seed crop of *Picea abies*. — Comm. Inst. For. Fenn. 67 (5): 1—84.

Seitner, M. 1908. Die Fichtensamengallmücke *(Plemeliella abietina)*. — Centralbl. gesamte Forstwesen 34: 185—190.

—»— 1916. Über Nadelholzsamen zerstörende Chalcididen. — Centralbl. gesamte Forstwesen 42: 307—324.

Smetanin, A. N. 1970. Borba s wrediteljami schischek i semjan sosny. — Zatschita rastenij 7: 37—38. (Ref. For. Umschau 14: 140, 1971.)

Spessivtseff, P. 1924. Grankottmätarna (*Eupithecia abietaria* Götze och *strobilata* Hb.) och deras skadegörelse. (Referat: *Eupithecia abietaria* Götze und *Eupithecia strobilata* Hb., zwei Schädlinge der Fichtenzapfen.) — Meddel. Skogförsöksanst. 21: 295—310.

Stadnitskij, G. V., Grebenstsikova, V. P., Naumov, V. F. & Jelizarov, S. F. (Стадницкий Г. В., Гребенщикова, В. П., Наумов, В. Ф. Елизаров, С. Ф.) 1972. Авиахимборъба с вредителями семяи ели. 1971. Lesnoje Hozjaistvo 11: 64—66.

Trägårdh, I. 1917. Undersökningar över gran- och tallkottarnas skadeinsekter. (Summary: Investigation into the insects injurious to spruce and pine cones.) — Meddel. Skogsförsöksanst. 13—14: 1141—1204.

Yates, H. O. III & Lewis W. G. 1969. An accurate and safe hand-operated vehicle-mounted applicator for granular insecticides in seed orchards. — J. Econ. Ent. 62: 246—248.

Suomenkielinen selostus

KUUSEN KÄPY- JA SIEMENTUHOLAISTEN KEMIALLISESTA TORJUNNASTA SIEMENVILJELMILLÄ

Vaikka hyönteiset turmelevatkin vuosittain varsin huomattavan osan kuusen siemensadosta, näitten tuholaisten torjuntaa metsässä ei ole kuitenkaan pidetty taloudellisesti kannattavana. Vasta kun havupuitten siementä ruvettiin tuottamaan siemenviljelmissä, tuli käpy- ja siementuholaisten torjunta ajankohtaiseksi.

On useita syitä, miksi siemenviljelmillä käpy- ja siementuholaisten torjunta on katsottu taloudellisesti kannattavaksi. Ensinnäkin siemenviljelmien perustaminen on vaatinut melkoisesti kustannuksia, joten niillä tuotettu siemen on suhteellisen kallista metsästä kerättyyn siemeneen verrattuna. Toiseksi torjuntatoimenpiteiden suorittaminen on suhteellisen helppoa, koska puut tuottavat siementä jo verraten nuorina, joten käpyä kantava latvus on helposti tavoitettavissa. Kolmanneksi on todennäköistä, että siemenviljelmät tarjoavat ilmastollisesti ympäristöään edullisemmat lisääntymismahdollisuudet monille hyönteisille. Näiden seikkojen valossa voidaan siemenviljelmiä täysin verrata hedelmäpuuviljelmiin, joissa tuholaisten torjuntaruiskutuksia suoritetaan useita kertoja kasvukauden aikana.

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää, missä määrin käpy- ja siementuholaisia voidaan torjua kemiallisilla aineilla, ja onko näillä aineilla vaikutusta siementen laatuun. Kävyissä elää monia tuholaisia, jotka munivat käpyyn hyvinkin eri aikoina, joten tutkimuksen toisena tarkoituksena oli löytää sellainen torjunta-ajankohta, että vain yksi käsittely olisi tarpeen.

Tutkimukset suoritettiin metsäntutkimuslaitoksen Ruotsinkylän kokeilualueessa vv. 1969—1971. Torjunta-aineiksi valittiin DDT, lindaani, dimetoaatti ja metasystox. Käpyjä ruiskutettiin ruiskupistoolilla kukkimisaikana, käpyjen käännyttyä alaspäin ja käpyjen saavutettua lähes täyden kokonsa. Kävyt kerättiin elokuun lopulla lähempää tarkastelua varten.

Tutkimuksessa todettiin, että kuusen käpykoisa *(Dioryctria abietella)* ja kuusen käpykärpänen *(Hylemyia anthracina)* ovat verrattain helposti torjuttavissa. Tämä johtuu ilmeisesti siitä, että näiden lajien toukat ovat hyvin liikkuvaisia ja joutuvat näin ollen helposti kosketuksiin torjunta-aineiden kanssa. Sen sijaan käpykääriäisen *(Laspeyresia strobilella)* ja siemensääsken *(Plemeliella abietina)* aiheuttamia tuhoja voitiin menestyksellisesti torjua ainoastaan systeemisillä insektisideillä (dimetoaatti, metasystox). Siemenkiilukaisen *(Megastigmus strobilobius)* torjunta osoittaitui vaikeimmaksi. Ehkä suuremmat torjunta-aineväkevyydet olisivat antaneet parempia tuloksia.

Kaikki käytetyt torjunta-aineet lisäsivät tyhjien siementen suhteellista osuutta, kun käsittely tapahtui kukkimisaikana tai runsaan viikon kuluttua sen päättymisestä. Sen sijaan kun ruiskutus tapahtui kolme viikkoa kukkimisajan jälkeen (kävyt lähes täysikasvuisia), ei torjunta-aineilla enää ollut merkittävää vaikutusta siementen laatuun.

Klooratut hiilivedyt (DDT, lindaani) eivät saatujen tulosten perusteella ole kovinkaan käyttökelpoisia kuusen käpy- ja siementuholaisten torjunnassa, silloin kun hyönteiset pyritään tappamaan kävyn sisään. Sen sijaan systeemisiä torjunta-aineita voidaan varsin hyvin käyttää tähän tarkoitukseen siemenviljelmillä. Parhaimman tuloksen antoi dimetoaatti, jota vähäisemmän myrkyllisyytensäkin vuoksi voidaan pitää suositeltavimpana. Systeemisten torjunta-aineiden konsentraation tulee olla kuitenkin huomattavasti suurempi (vähintään 0.5 % aktiivista ainetta) kuin tavallisessa käytössä. Liian suuria väkevyyksiä (yli 1 %) olisi kuitenkin vältettävä, koska fytotok-

sisuus lisääntyy väkevyyden kasvaessa. Paras käsittelyajankohta on kesäkuun loppupuoli (noin kolme viikkoa kukkimisen jälkeen). Ruiskutusta kukkimisaikaan olisi vältettävä, sillä on erittäin todennäköistä, että hyvin monet torjunta-aineet vaikuttavat haitallisesti siitepölyhiukkasten itämiseen ja aiheuttavat täten tyhjien siementen muodostumista. Torjunta-aineiden vaikutusta voidaan lisätä käsittelemällä myös käpyjen läheisyydessä olevat neulaset.

A SYSTEM FOR SIMULATION OF THE DEVELOPMENT OF STEM-DIAMETER DISTRIBUTIONS

BY

HANNU VÄLIAHO and YRJÖ VUOKILA

SELOSTE

RUNKOLUKUSARJAN KEHITYKSEN SIMULOINTIMENETELMÄ

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0075-7

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

PREFACE

This paper constitutes a part of a major investigation that covers various approaches to the construction of multiple yield tables, with special reference to the use of temporary sample plots.

The paper is concerned with the approximation of stem-diameter distributions by means of beta-functions, and their development as affected by growth and thinning.

The aspects of the study have been the responsibility of the authors as follows: Vuokila created the basic forestry framework, presented the mathematical problems to be solved, and provided the material used. Väliaho was responsible for the mathematical analyses proper. These two lines proceeded stepwise, and called for close cooperation and the exchange of ideas between the authors. The manuscript was written by Väliaho and checked by Vuokila.

The authors wish to thank Mr J u k k a M ä k e l ä for the assistance he provided in planning and coding the necessary computer programs, and in performing the practical calculations.

Helsinki, May 1973

Hannu Väliaho *Yrjö Vuokila*

CONTENTS

	Page
1. Introduction	5
2. The beta-function	7
2.1. General description	7
2.2. Fitting to a stem-diameter distribution	8
2.3. Suitability for stem-diameter distributions	8
3. Thinning	11
3.1. Thinning programme	11
3.2. Definition of standard thinning	11
4. Projecting a distribution	15
5. Construction of the system	17
6. An application	21
7. Discussion	24
8. Summary	26
References	27
Seloste	28

1. INTRODUCTION

During recent years, growth and yield tables have increasingly been constructed by the use of tree increment functions based upon data concerning individual trees (cf. V u o k i l a 1965, 1967). When this principle is applied, the development of a stem-diameter distribution may be simulated. In this approach, the following phases are included:

(i) Construction of an initial stand table
(ii) Construction of tree increment functions
(iii) Choice of a thinning programme
(iv) Definition of a standard thinning
(v) Projection of a stem-diameter distribution in time

Different approximations have been employed for stem-diameter distributions. P e t t e r s o n (1955) has applied normal approximation. In view of the stiffness of the normal distribution, more flexible functions have been sought. Promising results have been obtained by the approximation of stem-diameter distributions by means of beta-functions (cf. Z ö h r e r 1972 and K e n n e l 1971). To facilitate the approximation, Z ö h r e r (1970) has developed a computer program, BETKLA, for fitting beta-functions to empirical distributions.

The present study is concerned with the approach outlined above. The phases (iii-v) are dealt with. The approximation of stem-diameter distributions by means of beta-functions is an essential feature of the study. In particular, a standard thinning procedure is defined for a stem-diameter distribution represented by a beta-function.

In the simulation system, stands are thinned and projected without bark. As the input material and output data refer to stems including bark, a procedure has been worked out for the removal and addition of bark.

The projection of a stand (phase v) covers a period from one thinning to another, i.e., one thinning cycle; this is accomplished by means of diameter increment functions (phase ii).

Following construction of the system, a numerical example is provided. An empirical initial pine stand is adopted, and a diameter increment function from Vuokila (1965) is used, together with a bark function from Petterson (1955). Before the final (fourth) cutting, a comparison is made between the results derived from the system and the final empirical data.

The present study constitutes a part of an investigation that covers all the above phases (i-v). Väliaho (1971) is concerned with the construction of initial stands (phase i). Extensive material is being compiled for the derivation of tree increment and bark functions (phase ii). After these functions have been inserted, along with a rule for the construction of initial stands in the system to be proposed, the calculation of growth and yield tables may be initiated.

2. THE BETA-FUNCTION

2.1. General description

The beta-function (see Z ö h r e r 1972) is given by

$$f(x) = c(x - a)^{\alpha}(b - x)^{\gamma} \tag{1}$$

where

a is the lower limit of the variable x
b is the upper limit of the variable x
α, γ are the first and second exponents
c is a multiplicative constant

The constant c is so determined that the area under the curve is the one desired. Thus, when a beta-function is being fitted to a stem-diameter distribution, c is so determined that the area under the curve equals the number of stems. Two typical beta-curves are illustrated in Fig. 1, Sec. 2.3.

For derivation of mode x_m of the beta-function (1), with the natural logarithm denoted by ln (as against log for Briggs' logarithm), we write:

$$\ln f(x) = \ln c + \alpha \ln(x - a) + \gamma \ln(b - x)$$

If

$$\frac{d \ln f(x)}{dx} = \frac{\alpha}{x - a} - \frac{b - x}{\gamma} \tag{2}$$

is put as equal to zero, then

$$x_m = \frac{\alpha b - \gamma a}{\alpha + \gamma}$$

2.2. Fitting to a stem-diameter distribution

When a beta-function is being fitted to an empirical stem-diameter distribution, the limits a and b are approximated, and calculation is made of the mean $\bar{x}$ and variance s^2. These quantities, together with the stem number N, uniquely determine the parameters of $f(x)$. After $f(x)$ has been obtained, the theoretical number of stems for any diameter interval can be derived by integration (numerical integration is applied).

Zöhrer (1970) has developed a computer program, BETKLA, for fitting a beta-function to any frequency distribution. First, a procedure is followed for the elimination of classification error. This comprises shifting the horizontal tops of the columns belonging to a histogram into skew positions. In fitting a beta-curve, Zöhrer applies an iterative extension by a certain amount of the upper limit b. For each iteration, there is evaluated the sum of squared deviations of the resulting beta-function from the empirical distribution. The beta-function at which this sum reaches a minimum is considered as "optimum", and is automatically selected.

In the present study, the program BETKLA was adopted, with three minor modifications:

(i) In the elimination of classification error, the skew tops of the columns were not allowed to pass beneath the x-axis;

(ii) In the iterative extension of b, steps of a length of 1 cm were employed; and

(iii) In selection of the optimal beta-function, the correlation coefficient r between the empirical distribution and the beta-function was used as criterion, instead of the sum of squared deviations (it should be noted that these two criteria are equivalent).

2.3. Suitability for stem-diameter distributions

The beta-function is a suitable mathematical model for a large variety of empirical distributions. This applies to many skew unimodal distributions, and most stem-diameter distributions are of this type.

The beta-function is fitted to an empirical stem-diameter distribution, so that the area under both figures is the same, viz. the number of stems.

Different criteria have been applied for evaluation of the goodness of fit of the beta-function:

(i) Visual considerations have shown that the suitability of the beta-function is good.

(ii) Most correlation coefficients have exceeded 0.90. However, in some older stands, r has been as low as 0.70. In these cases the numbers of stems in adjacent classes have varied noticeably.

(iii) Only slight differences have been apparent in the basal areas attached to the empirical distribution and the beta-approximation.

(iv) Furthermore, the volumes attached to the empirical and theoretical distributions were evaluated and compared. In all the cases considered the differences were negligible.

The correlation coefficient r, employed as a criterion of goodness of fit, is calculated from

$$r^2 = 1 - \frac{k-1}{k-3} \cdot \frac{\sum_i (\delta f_i - n_i)^2}{\sum_i (n_i - \bar{n})^2}$$

where

k is the number of classes

δ is the class width

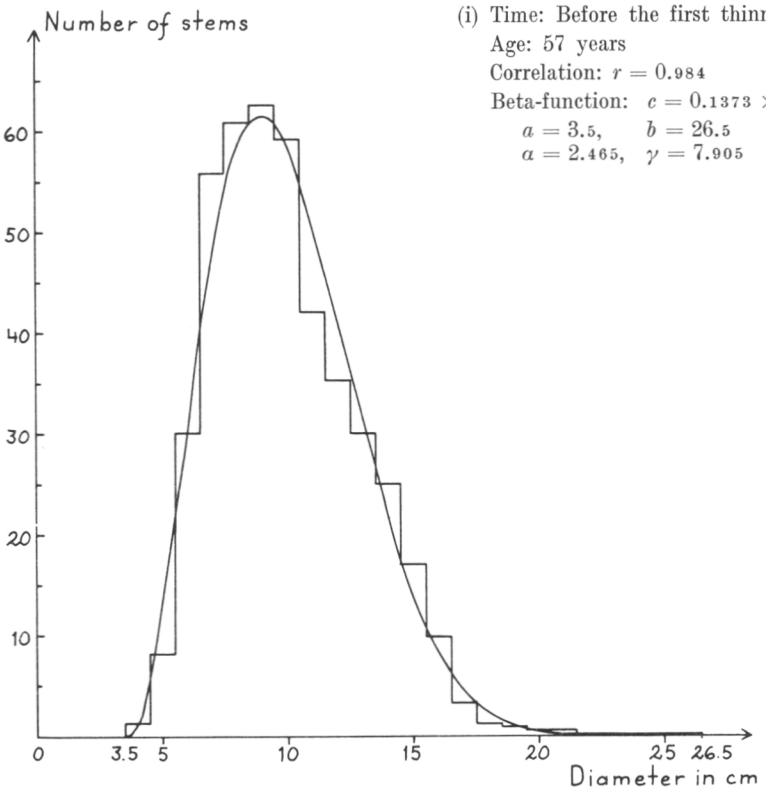
n_i is the number of stems in class No. i

$\bar{n}$ $= \sum_i n_i / k$

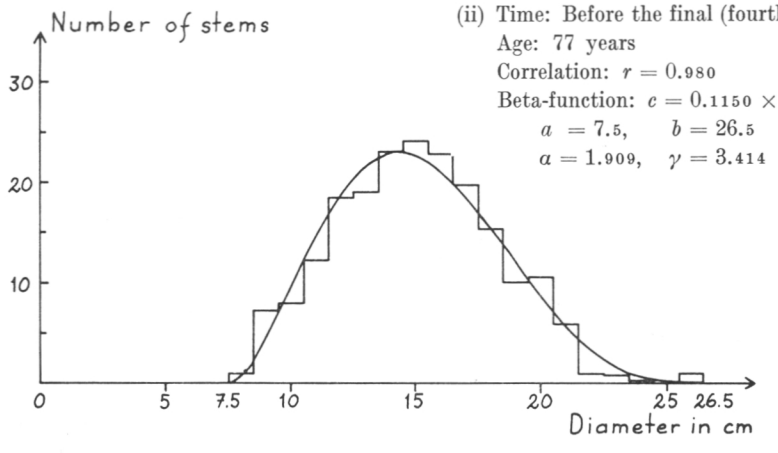
f_i is the value of the beta-function at the centre of class No. i

If r^2 should become negative, r is given a value of zero.

For illustration, a permanent pine sample plot which had undergone repeated thinnings was selected. The empirical stem-diameter distributions (excluding bark) before the first thinning and the final (fourth) cutting were approximated by beta-functions (see Fig. 1). Chap. 6 is concerned with the same stand.



(i) Time: Before the first thinning
Age: 57 years
Correlation: $r = 0.984$
Beta-function: $c = 0.1373 \times 10^{-9}$
$a = 3.5$, $b = 26.5$
$\alpha = 2.465$, $\gamma = 7.905$



(ii) Time: Before the final (fourth) cutting
Age: 77 years
Correlation: $r = 0.980$
Beta-function: $c = 0.1150 \times 10^{-3}$
$a = 7.5$, $b = 26.5$
$\alpha = 1.909$, $\gamma = 3.414$

Fig. 1. Two stem-diameter distributions (excluding bark) and the fitted beta-functions (a permanent pine sample plot)

3. THINNING

3.1. Thinning programme

In regard to theoretical thinnings in stand models, major attention is due to three basic principles: 1) type, 2) grade and 3) cycle of thinnings.

The type of thinning relates to the principles of defining the characteristics of trees for removal in a thinning. In the present study, consideration is given to selective thinning from below, uniform thinning, and their combination. Thinning from below indicates that dominated trees are removed in the first place, and accordingly that the mean diameter of trees cut is less than that of the surviving growing stock. In a uniform thinning, a stated percentage proportion is removed from every diameter class. In a combination of low and uniform thinning, a low thinning is effected first, followed by a uniform thinning.

The grade of thinning refers to the volume per unit area removed in thinnings. The terms light, heavy and very heavy thinning indicate the scope of the thinning grades generally applied. For example, the grade of a thinning may be expressed in terms of the percentage of basal area removed. The thinning grade defined in this way can be set at a constant level for the entire thinning phase of stand development, or it may be given varying values in different age phases, based upon the experience gained in permanent experiments, or from any other sources.

The thinning cycle denotes the interval between successive thinnings. It may be constant for the entire thinning phase, or vary in different age phases.

3.2. Definition of standard thinning

We proceed to define a standard thinning in a theoretical stem-diameter distribution, represented by a beta-function. A procedure will be derived for the combination of a thinning from below and a uniform thinning (cf. Petterson 1955, pp. 92—4).

Let the original stem-diameter distribution be represented by the $f(x)$ of (1). Denote

$$100p = \text{total removal percentage}$$
$$100p_l = \text{low thinning percentage}$$
$$100p_u = \text{uniform thinning percentage}$$

If the original basal area equals G, we have

$$(1 - p_u)(1 - p_l)G = (1 - p)G$$

In what follows, we assume that p and p_u are given. Then p_l can be derived from

$$p_l = \frac{p - p_u}{1 - p_u} \tag{3}$$

In the definition of a standard thinning, the following steps are taken (cf. Fig. 2):

(i) Determine a point x_0 $(a < x_0 < b)$.

(ii) Determine an initial value of a_1.

(iii) Shift the original curve $y = f(x)$ to the right by an amount of $\delta_1 = a_1 - a$, obtaining the curve $y = f_1(x) = f(x - \delta_1)$.

(iv) Derive a new curve $y = f_2(x)$ with

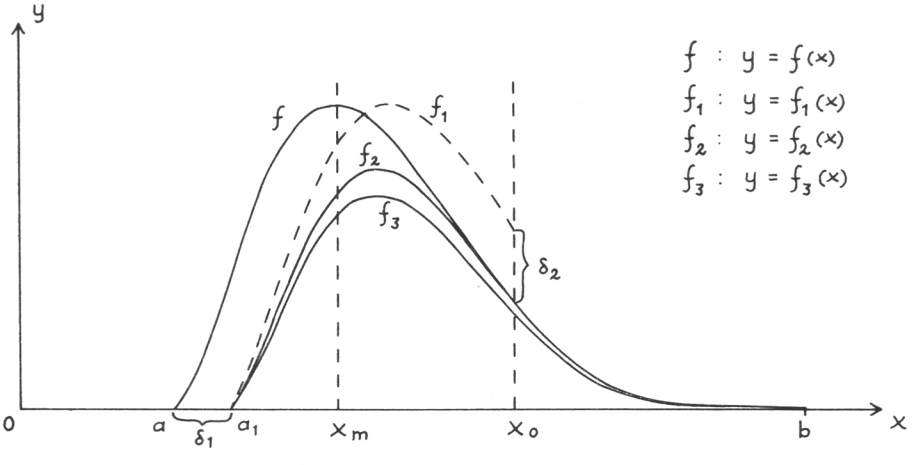


Fig. 2. Illustration of standard thinning

$$f_2(x) = \begin{cases} (1 - kd^{x-x_0})f_1(x) & \text{if } a_1 \le x \le x_0 \\ f(x) & \text{if } x_0 < x \le b \end{cases} \tag{4}$$

where k and d are so determined that $f_2(x)$ and $f_2'(x)$ are continuous in x_0.

(v) Derive the curve $y = f_3(x) = (1 - p_u)f_2(x)$, corresponding to the remaining stand, and approximate it by a frequency distribution.

(vi) Calculate the basal area corresponding to the distribution curve $y = f_3(x)$ and compare it with the basal area desired.

(vii) If necessary, choose a new value for a_1 and return to (iii). Otherwise, end the process.

In (i), x_0 is determined from

$$x_0 = x_m + \tau(p)(b - x_m)$$

where

$$\tau(p) = p\,[2(1 - p)^2 + 1] = 2p^3 - 4p^2 + 3p \tag{5}$$

When the form of $\tau(p)$ was being decided, the following requirements were set up:

$$\tau(0) = 0$$
$$0 < \tau(p) < 1 \qquad 0 < p < 1$$
$$\tau(1) = 1$$

Moreover, graphic considerations and empirical testing were applied. The graph of function (5) is contained in Fig. 3.

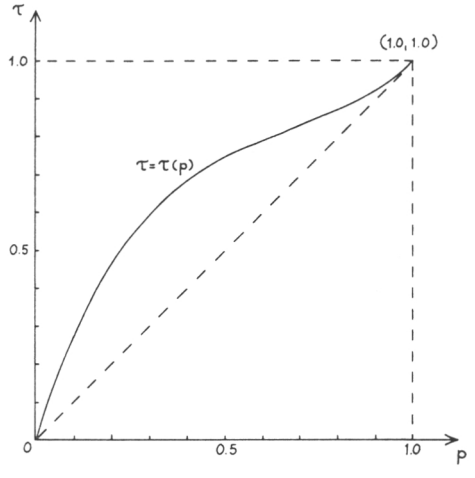


Fig. 3. The graph of the function $\tau = \tau(p)$

In (ii), an initial value of a_1 may be determined by application of the principle of homotety: think of drawing a curve homotetic to the curve $y = f(x)$, with b as homotety centre, so that the area under the resulting

curve is $1 - p_l$ times that under the original curve; the point corresponding to a is then chosen as a_1. This principle yields

$$(b - a_1)^2/(b - a)^2 = 1 - p_l$$

or

$$a_1 = b - (b - a)\sqrt{1 - p_l} \tag{6}$$

In the derivation of this formula, the ratio of stem numbers has been approximated by the ratio of basal areas. However, formula (6), derived by Jukka Mäkelä, has proved satisfactory.

In (iv), the condition $f_2(x_0) = f(x_0)$ yields

$$(1 - k)f_1(x_0) = (1 - k)f(x_0 - \delta_1) = f(x_0)$$

On denoting $\delta_2 = f(x_0 - \delta_1) - f(x_0)$ we obtain

$$k = \frac{f(x_0 - \delta_1) - f(x_0)}{f(x_0 - \delta_1)} = \frac{\delta_2}{f(x_0 - \delta_1)}$$

Then denote

$$\bar{f}_2(x) = (1 - kd^{x-x_0})\, f(x - \delta_1)$$

There is derived

$$\frac{d\ln\bar{f}_2(x)}{dx} = \frac{-kd^{x-x_0}\ln d}{1 - kd^{x-x_0}} + \frac{\alpha}{x_0 - a_1} - \frac{\gamma}{b + \delta_1 - x} \tag{7}$$

On equating (2) and (7) for $x = x_0$, we obtain

$$\ln d = \frac{\delta_1(1 - k)}{k}\left[\frac{\alpha}{(x_0 - a)(x_0 - a_1)} + \frac{\gamma}{(b - x_0)(b + \delta_1 - x_0)}\right]$$

from which d is easily derived.

In (vii), after the first cycle, a_1 is diminished or increased by a class width, according as whether the resulting basal area is too small or too large; a move is then made to (iii). After subsequent cycles, we proceed in a similar fashion until the sign of the error in basal area is changed; the curve giving the smallest absolute error is then chosen, and the process is terminated.

Finally, we note that the functions $f_2(x)$ and $f_3(x)$ are not beta-functions. (Trials were also made to define a final function $\bar{f}_3(x)$ in the form of a beta-function. However, the candidates did not satisfy $\bar{f}_3(x) \leq f(x)$ for all x, which is a logical necessity.)

4. PROJECTING A DISTRIBUTION

Assume that we have an arbitrary frequency distribution, classified according to a given variable x, employing a class width δ. Let the values x be transformed into $z = g(x)$, where $g(x)$ is a monotonically increasing function of x. For example, x may be the diameter of a tree at a given moment, and z that at a later moment. Or x may be the diameter of a tree including bark, and z that excluding bark. The aim is that of constructing a frequency distribution, classified according to z, and employing a class width $\bar{\delta}$.

Denote the inverse function of g by g^{-1}, i.e. $x = g^{-1}(z)$. Consider class No. s on the z-axis, covering the interval $z_s \leq z < z_{s+1}$, cf. Fig. 4. Draw horizontal lines from points z_s and z_{s+1} of the z-axis to the curve $z = g(x)$. Denote the cross sections by P_s and P_{s+1}. The projections of these points on the x-axis are $g^{-1}(z_s)$ and $g^{-1}(z_{s+1})$. Then, if $g^{-1}(z_s)$ and $g^{-1}(z_{s+1})$ belong to the same x-class No. t, the number $\bar{N}_s$ of elements in the z-class No. s may be approximated as

$$\bar{N}_s = \frac{g^{-1}(z_{s+1}) - g^{-1}(z_s)}{\delta} \cdot N_t \tag{8}$$

where N_t is the number of elements in x-class No. t. If, on the other hand, $g^{-1}(z_s)$ and $g^{-1}(z_{s+1})$ belong to the x-classes t and $t+q$, $q \geq 1$, $\bar{N}_s$ is approximated from

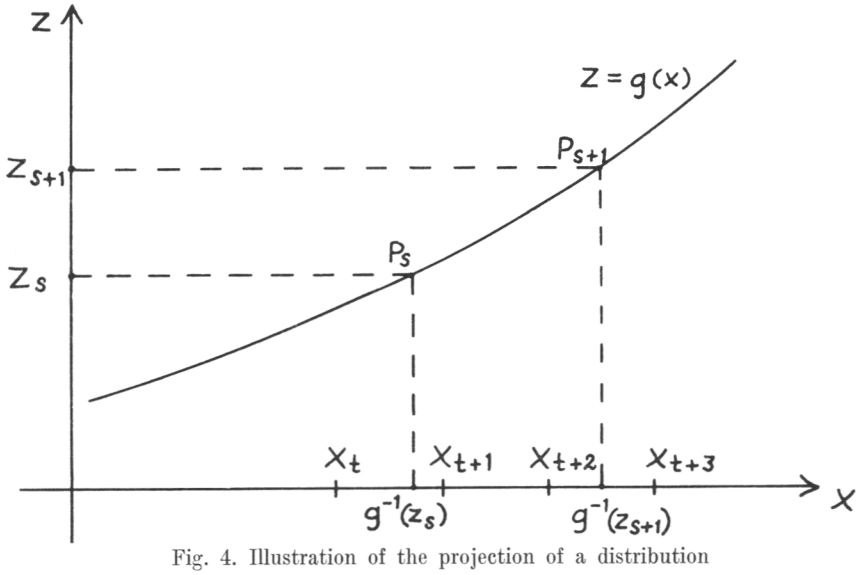


Fig. 4. Illustration of the projection of a distribution

$$(9) \qquad \bar{N}_s = \frac{x_{t+1} - g^{-1}(z_s)}{\delta} N_t + \sum_{i=t+1}^{t+q-1} N_i + \frac{x_{t+q+1} - g^{-1}(z_{s+1})}{\delta} N_{t+q}$$

where, for $q = 1$, the midmost term is deleted.

Above, it was assumed that δ is sufficiently small. If this is not the case, an elimination of the classification error must be effected (cf. Sec. 2.2). Then the right hand side of (8), and the extreme terms on the right hand side of (9), must be replaced by expressions that indicate the area of a trapezoid.

No difficulty is encountered in determination of the values $g^{-1}(z_s)$, if $g^{-1}(z)$ may be expressed in terms of elementary functions. However, frequently the function $g(x)$, but not $g^{-1}(z)$, may be expressed in this way. The points $g^{-1}(z_s)$ must then be determined by some iterative method; one possible expedient is outlined below.

Let a distribution according to variable x be given. Denote $z_{\min} = g(x_1)$, where x_1 is the lower limit of the first x-class. Then z_2 is the nearest class limit above $z_{\min}$. A systematic search for $g^{-1}(z_2)$ is made, starting from the under-estimate (over-estimate)

$$(10) \qquad \hat{g}^{-1}(z_2) = x_1 + (z_2 - z_{\min})$$

and using steps of length 1 mm. After an over-estimate (under-estimate) has been obtained, the final estimate is determined by interpolation. The estimate (10) is an under-estimate or an over-estimate according as whether function $g(x)$ for $x = \hat{g}^{-1}(z_2)$ yields a value smaller or greater than z_2. Any value $g^{-1}(z_s)$, $s \geq 3$, is determined analogously, by application of the initial guess

$$(11) \qquad \hat{g}^{-1}(z_s) = g^{-1}(z_{s-1}) + \Delta$$

where

$$\Delta = \begin{cases} \delta & \text{for } s = 3 \\ g^{-1}(z_{s-1}) - g^{-1}(z_{s-2}) & \text{for } s > 3 \end{cases}$$

5. CONSTRUCTION OF THE SYSTEM

In the preceding chapters, some fundamental concepts and definitions were presented in regard to the simulation of the development of stand tables. The final system remains to be outlined. Consideration is given to an initial stem-diameter distribution (including bark). A thinning programme with an immediate initial thinning is stated, including

(i) number L of thinnings

(ii) thinning cycle Δt

(iii) total thinning percentage $100p$

(iv) uniform thinning percentage $100p_u$

The quantities (ii-iv) may be constant, or may be varied during the stand development. The aim is that of deriving the stem-diameter distribution (including bark) before the last thinning, which is in fact regarded as a final cutting. In the normal simulation of stand development, diameters excluding bark are employed. Only the input and output are stated in terms of diameters including bark.

Fig. 5 reproduces a flow chart for the system. A description of the flow chart follows:

Box 1. The input material consists of the initial stem-diameter distribution (including bark), with a class width of 1 cm, together with the quantities that define the thinning programme (see above).

Box 2. The initial distribution is transformed into a distribution, classified according to the diameter excluding bark, with a class width of 1 cm. In accordance with P e t t e r s o n (1955, pp. 313—4), we adopt a tranformation of the form

$$z = g(x) = x - ax^b$$

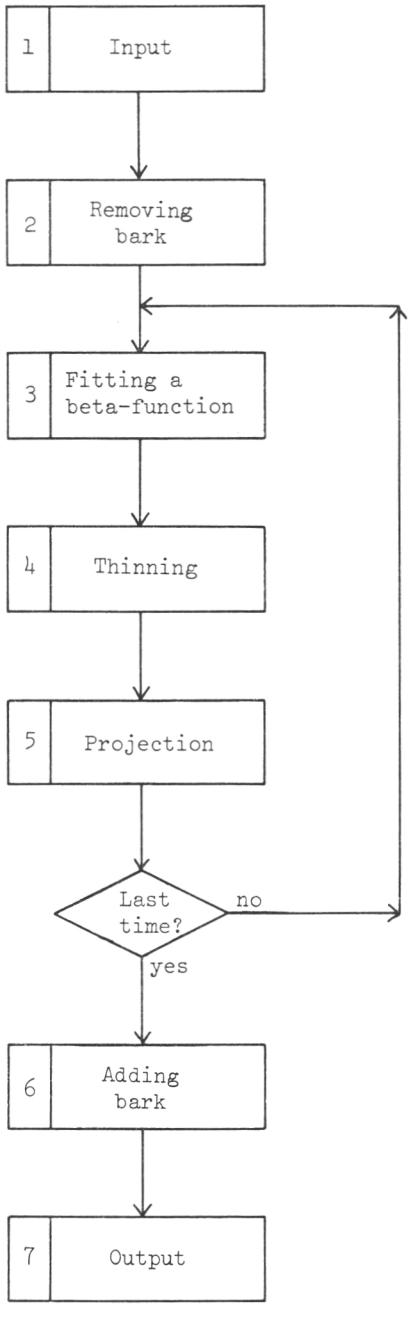


Fig. 5. Flow chart of the system for stand development

where

x is the diameter including bark
z is the diameter excluding bark
a, b are constants which must be given

The results of Chap. 4 are applied, including the iterative method for determination of the values of $g^{-1}(z_s)$.

Box 3. The distribution to be approximated is a stem-diameter distribution (excluding bark), with a class width of 1 cm. Again, an elimination of classification error is first performed. A beta-function is then fitted by application of the computer program BETKLA (cf. Sec. 2.2). Five iterative extensions of b are made by an amount of 1 cm. After the optimal beta-function has been chosen, it is approximated by a frequency distribution with a class width of 2 mm. This is necessary for calculation of the basal area in Box 4. (In the frequency distribution, classes that include stems of less than 0.005 are omitted. All the remaining frequencies are multiplied by a coefficient slightly exceeding one, so that the theoretical number of stems takes on equality with the empirical one.)

Box 4. The principles of thinning were presented in Chap. 3. Some details follow. The curve $y = f_3(x)$ is to be represented (and also to be stored in the computer memory) as a frequency distribution with a class width of 2 mm. Points x_m and x_0 are rounded to the nearest class centres, and a_1 to the nearest class limit. As a consequence, a_1 is shifted in steps of length 2 mm.

If at any stage, the chosen a_1 implies $a_1 - a > x_0 - x_m$, then $f(x_0 - \delta_1)$ has no meaning. Consequently, a new x_0 is chosen: $x_0 = x_m + (a_1 - a)$. The search for a_1 is then continued from the current value.

Box 5. Initially, we have a stem-diameter distribution (excluding bark), approximating the curve $y = f_3(x)$, with a class width of 2 mm. When this distribution is projected in time, a tree increment function of the form

$$z = g(x) = x[1 + p(x)]^t \tag{12}$$

is used, where

x is the current diameter
z is the diameter after t years
$100p_d(x)$ is the diameter growth percentage

with the bark excluded.

In (12), it is assumed that $t = \Delta t$ (the thinning cycle) is given. According to Vuokila (1965), $p_d(x)$ is assumed to be of the form

$$p_d(x) = a + b/x$$

where a and b are constants. Formula (12) may then be rewritten as

$$z = g(x) = x(1 + a + b/x)^{\Delta t} \tag{13}$$

We observe that, for determination of the points $g^{-1}(z_s)$, the iterative method of Chap. 4 is needed.

If the projection was the last, a move is made to Box 6. Otherwise, the distribution is transformed, by combining classes, into one with a class width of 1 cm, and a move is made to Box 3.

Box 6. Initially, we have a stem-diameter distribution excluding bark, with a class width of 2 mm. The aim is that of forming a final stem-diameter distribution including bark, with a class width 1 cm. In this projection, we have (cf. Box 2):

$$x = g^{-1}(z) = z - az^b$$

where

x is the diameter excluding bark
z is the diameter including bark
a, b are constants

Thus the values of $g^{-1}(z_s)$ are readily obtainable.

Mention is due that when a class width of 1 cm is employed, the class centres are so chosen that they fall on full centimetres, and when a class width of 2 mm is employed, on even millimetres.

6. AN APPLICATION

For illustration of the system of simulation, a permanent pine sample plot from Central-Finland (Evo) was selected. The sample plot had been subjected to three thinnings (at the ages of 57, 66 and 72 years). The final cutting had been effected at the age of 77 years. The empirical stem-diameter distributions (including bark) before and after each thinning, and before the final cutting, are listed in Table 1. The first and last distribution (excluding bark) are indicated in Fig. 1, together with the fitted beta-functions.

Table 1. Development of a stem-diameter distribution (including bark) (emp. = empirical; theor. = theoretical)

d cm	1st thinning (age = 57)		2nd thinning (age = 66)		3rd thinning (age = 72)		Final cutting (age = 77)	
	before	after	before	after	before	after	emp.	theor.
5	4							
6	10	3	2					
7	34	20	10	3	1			
8	53	39	25	9	7			
9	55	49	32	15	11	3	1	0.02
10	51	42	37	26	15	5	6	0.98
11	57	48	43	33	24	11	7	5.30
12	42	39	28	23	24	15	9	12.33
13	33	31	42	38	27	16	15	19.84
14	31	30	29	27	34	27	18	25.20
15	24	24	29	28	23	20	17	27.49
16	22	18	28	27	27	20	23	26.64
17	12	12	24	21	27	21	19	23.42
18	9	9	13	13	20	19	21	18.99
19	3	3	13	13	18	16	18	14.21
20	1	1	6	6	7	6	15	9.93
21	1	1	5	5	12	12	9	6.42
22	0	0	2	2	8	7	10	3.87
23	1	1	0	0	3	2	8	2.15
24			0	0	1	1	3	1.11
25			2	2	0	0	0	0.52
26					0	0	1	0.22
27					2	1	0	0.08
28							0	0.02
29							1	0.00
Stems	443	370	370	291	291	202	201	198.74
Stems/ha	1 772	1 480	1 480	1 164	1 164	808	804	794.96
Basal area/ha	14.88	13.29	16.72	14.65	17.24	13.33	14.96	13.16

The thinning grades, given in Table 2, are determined from the data included in Table 1 as follows:

(i) The total removal percentages $100p$ are calculated from the basal areas to be found in Table 1;

(ii) The uniform thinning percentages $100p_u$ are put equal to $0.15 \times 100p$; and

(iii) The quantities p_l are calculated from (3).

Table 2. Thinning programme for the simulation

Thinning No.	Age in years	$100p$	$100p_l$	$100p_u$
1	57	10.75	9.28	1.61
2	66	12.36	10.71	1.85
3	72	22.68	19.96	3.40
4	77	100.00	—	—

For the removal and addition of bark, a function is needed for estimation of the thickness of bark of pine. A function by Petterson (1955, p. 313), which relates to the circumstances in Northern Sweden, was adopted, implying the transformation

$$z = g(x) = x - 0.1283x^{0.9441}$$

where

x is the diameter including bark

z is the diameter excluding bark

The diameter increment functions (excluding bark) were derived from a function by Vuokila (1965, p. 56), relating to circumstances in Central-Finland. The substitution of those variables constant for all values of d at a given moment led to the following functions:

$$100p_d = 0.443 + 8.598/d \qquad \text{(first thinning)}$$

$$100p_d = 0.318 + 8.616/d \qquad \text{(second thinning)}$$

$$100p_d = 0.287 + 8.872/d \qquad \text{(third thinning)}$$

The simulation system was initiated from the stem-diameter distribution prior to the first thinning. The final theoretical stem-diameter distribution is indicated in the last column of Table 1. The final empirical and

theoretical distributions are compared in Fig. 6, where the theoretical distribution is represented by a curve. It is understandable that the fit is not very good, since the bark and diameter increment functions were not suited for the special sample plot used.

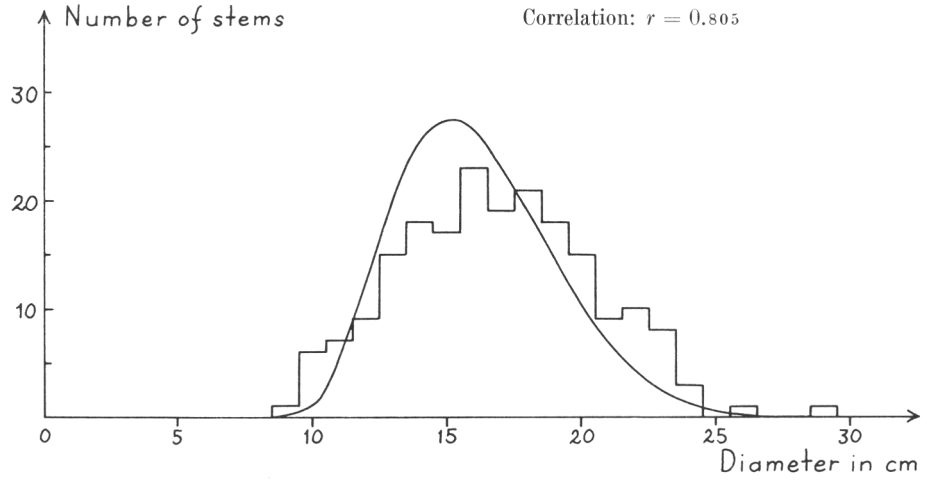


Fig. 6. Comparison of final empirical (histogram) and theoretical (curve) stem-diameter distributions

7. DISCUSSION

The system presented in this paper is but one of the alternative approaches that are applicable in the prediction of stand development when multiple yield tables are being constructed for forest stands. Emphasis is thereby laid upon the information in regard to the size of trees to be produced, a necessary basis for predictions of the financial yield obtainable from stands under varying management.

The major difficulty encountered in the present system lies in the thinning of the stand model. Thinning cannot be carried out tree by tree with the competition between neighbouring trees taken into account, nor can any other individual differences between trees be considered. Only the size of the trees to be removed in each thinning is known, and the reaction of trees to thinning can be estimated only as an average of the size class in question. Accordingly, a formal thinning procedure must be developed. It would be highly advisable to try to develop more flexible models which would better correspond to the actual circumstances in natural surroundings.

The future research activity of the authors will be largely devoted to solution of the problem involved by thinning in stand models. An endeavour will be made to create a system that will allow of the use of neighbour analyses in the models, and the application of a thinning procedure that will enable optimization of the growth of the surviving growing stock after thinning. This will presumably lead to stand models in which each tree is localized in relation to its neighbours, and in which — accordingly — thinning can be specified on the level of individual trees. Visually, this would call for a stand map indicating the locations of the trees of the initial growing stock.

Here, the computations concerned with the projection of stem-diameter distributions proceed tree by tree, with due account taken of the environment of individual trees and the changes that thinning induces in it. By this means, it should be practicable to approach natural conditions as closely as can be imagined when stand models are being dealt with.

However, a need may exist for more extensive projections of stem-diameter distributions and other stand characteristics. By estimation of the

changes in certain parameters and characteristics of beta-distributions resulting from growth and thinning, it may be possible by application of the principles of regression analysis to develop a relatively simple and rapid method which would in many cases satisfy the requirements of accuracy. Later reports will be made on the results obtained in analyses undertaken with a view to the solution of these and many other problems of yield studies.

8. SUMMARY

A system is proposed for simulation of the development of the stem-diameter distribution of a theoretical stand. It is assumed that an initial stand table is given. A thinning programme is established for the stand, including the number of thinnings, the thinning cycles and the thinning grades. In the simulation, stem-diameter distributions are approximated by beta-functions, and a special standard thinning procedure is constructed. Standard thinning is constituted in the combination of a thinning from below and a uniform thinning. A stem-diameter distribution is projected over a period between two thinnings by the employment of diameter increment functions. The projections and thinnings are effected in terms of diameters excluding bark, but the input and output are in terms of diameters including bark. Consequently, a transformation procedure for the removal and addition of bark has been necessary.

A flow chart of the system is reproduced in Fig. 5 on p. 18. The form of the function for the estimation of bark thickness has been adopted from Petterson (1955, pp. 313—4). For the fitting of beta-functions to stem-diameter distributions, a computer program, BETKLA, by Zöhrer (1970) has been applied. The standard thinning is defined for a stem-diameter distribution represented by a beta-function. For the projection of a stem-diameter distribution, diameter increment functions are needed. The general form of these functions has been taken from Vuokila (1965, p. 56).

For illustration of the system of simulation, a numerical example is provided. A permanent pine sample plot from Central-Finland is selected (see Table 1 on p. 21). The development of this plot is simulated by the system introduced. The final empirical and theoretical stem-diameter distributions are compared in Table 1, p. 21, and Fig. 6, p. 23. This illustration is completely technical in nature, since the bark and tree increment functions are not suited for the special sample plot concerned.

REFERENCES

K e n n e l, R. 1971. Die Konstruktion von Ertragstafeln mit Hilfe von Durchmesserverteilungen und Einheitshöhenkurven. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, H.2, S. 117—128. Hamburg und Berlin.

P e t t e r s o n, H. 1955. Barrskogens volymproduktion. *Meddelanden från statens skogsforskningsinstitut*, Band 45, Nr 1 A. Stockholm.

V u o k i l a, Y. 1965. Functions for variable density yield tables of pine based on temporary sample plots. *Metsäntutkimuslaitoksen julkaisuja (MTJ)* 60.4. Helsinki.

—»— 1967. Eriasteisin kasvatushakkuin käsiteltyjen männiköiden kasvu- ja tuotostaulukot maan eteläistä sisäosaa varten. Summary: Growth and yield tables for pine stands treated with intermediate cuttings of varying degree for southern Central-Finland. *MTJ* 63.2. Helsinki.

V ä l i a h o, H. 1971. The effect of competition on the structure of seedling stands. Seloste: Kilpailun vaikutus taimistojen rakenteeseen. *MTJ* 74.1. Helsinki.

Z ö h r e r, F. 1970. Das Computerprogram BETKLA zum Ausgleich von Stammzahl - Durchmesservertailungen oder beliebigen anderen Häufigkeitsvertailungen. *Mitteilungen der Bundesforschungsanstalt für Forst- und Holzwirtschaft.* Reinbek bei Hamburg, Nr. 76.

—»— 1972. The beta-distribution for best fit of stem-diameter-distributions. *Third Conference Advisory Group of Forest Statisticians.* Jouy-en-Josas 1970. Paris.

SELOSTE

RUNKOLUKUSARJAN KEHITYKSEN SIMULOINTIMENETELMÄ

Tutkimuksessa esitetään metsikön runkolukusarjan kehityksen simulointimenetelmä. Lähtörunkolukusarja oletetaan tunnetuksi. Metsikölle määritellään harvennusohjelma, joka sisältää harvennusten lukumäärän, harvennusvälien pituudet ja harvennusasteet. Runkolukusarjoja approksimoidaan beta-funktioilla. Keskeinen tehtävä on teoreettisen harvennusmenettelyn kehittäminen. Harvennus koostuu alaharvennuksesta ja sellaisesta harvennuksesta, jossa poistetaan sama suhteellinen osuus kaikista läpimittaluokista. Runkolukusarjan kehitys kahden harvennuksen välisenä aikana arvioidaan käyttämällä läpimitan kasvufunktioita. Kehitysennusteet laaditaan ja harvennukset suoritetaan kuorettomin läpimitoin. Koska kuitenkin läpimitat syöttö- ja tulostusvaiheessa ovat kuorellisia, on ollut välttämätöntä laatia menettely kuoren poistamiseksi ja lisäämiseksi.

Simulointimenetelmän kulkukaavio on esitetty kuviossa 5 sivulla 18. Seuraavassa annetaan muutamia tarkennuksia:

1. Syöttö. Syöttötietoina annetaan lähtörunkolukusarja ja harvennusohjelma.
2. Kuoren poisto. Kuoren paksuuden arvioimisessa käytetyn funktion yleinen muoto on otettu Pettersonin tutkimuksesta (1955, ss. 313—4).
3. Beta-funktion sovitus. Beta-funktio sovitetaan runkolukusarjaan käyttämällä Zöhrerin (1970) kehittämää tietokoneohjelmaa BETKLA.
4. Harvennus. Teoreettinen harvennusmenettely on laadittu beta-funktion muodossa esitetylle läpimittajakaumalle.
5. Kehitysennuste. Läpimitan kasvufunktioiden yleinen muoto on otettu Vuokilan tutkimuksesta (1965, s. 65).
6. Kuoren lisääminen.
7. Tulostus.

Menetelmän sovellutuksena on simuloitu erään keskisuomalaisen männikön kestokoealan kehitystä (taulukko 1, s. 21). Lopullista mitattua ja teoreettista runkolukusarjaa on vertailtu taulukossa 1, s. 21, ja kuviossa 6, s. 23. Esimerkki on luonteeltaan tekninen, sillä käytetyt kuori- ja kasvufunktiot eivät ole täysin kyseisen metsikön olosuhteita vastaavia.

ON SELF-POLLINATION, GENETIC LOAD, AND SUBSEQUENT INBREEDING IN SOME CONIFERS

BY

VEIKKO KOSKI

GENEETTISEN KUORMAN VAIKUTUS ITSEPÖLYTYKSESTÄ AIHEUTUVAAN SUKUSIITOKSEEN ERÄILLÄ HAVUPUILLA

SUOMENKIELINEN SELOSTUS

HELSINKI 1973

ISBN 951-40-0076-5

Helsinki 1973. Valtion painatuskeskus

PREFACE

Experiments with and measurements of the sexual reproduction of conifers have been carried out on a fairly large scale for many years at the Finnish Forest Research Institute. Several publications of these studies have appeared. The present work aims at combining the available results for the composition of pollination, embryogeny and genetic load with a single phenomenon — inbreeding. An entity which seems to be an essential component of the genetic system of conifers has originated in this way.

The investigation material was collected over a period of several years. Many people participated in the work — in tree tops performing crossing, in the laboratory treating seeds, in the greenhouse growing seedlings, etc. I recall best those who participated in the production of the publication itself, as this phase seems to be the best. In the compilation of the text and tables I was assisted by Mrs Raili Tallqvist, and the drawings were made by Miss Sisko Salminen. The manuscript was revised by Prof. Max Hagman and Prof. Risto Sarvas from whom I also received valuable advice. The text was translated from Finnish into English by Miss Päivikki Ojansuu, Mag. Phil., and the language was revised by Mr L. A. Keyworth, M. A. (Cantab.). I express my best thanks to those who participated in the collection and treatment of the material and in preparing the study for publication.

Helsinki, August 1973

Veikko Koski

ON SELF-POLLINATION, GENETIC LOAD, AND SUBSEQUENT INBREEDING IN SOME CONIFERS

Page

1. Introduction 5

2 Self-pollination and self-fertilization 7

3. Embryonic lethals 18

4. Genetic load in germination and later stages 27

5. Discussion 33

Summary 37

References 39

Suomenkielinen tiivistelmä: 41

1. INTRODUCTION

The sexual reproduction in natural stands of conifers always involves partly self-pollination and subsequent self-fertilizations. Own pollen represents a considerable proportion of wind pollination as the distance between the male and female flowers of the same tree is much shorter than between the inflorescences of different trees. Different methods of evaluation and measurement have established that the share of own pollen in the pollination of e.g. *Pinus sylvestris* is several tens of per cent (D o y l e and o'L e a r y 1935, S a r v a s 1962, K o s k i 1970, S t e r n 1972). The share of self-pollination varies widely, of course, in accordance with the ratio of own to foreign pollen. The extreme values established for labelled pollen in individual trees are 7 per cent (K o s k i, op.cit.) and 85 per cent (S t e r n, op.cit.).

It has proved possible in controlled self-pollinations of conifers to produce progenies from self-fertilization. As expected, progenies from self-fertilization are slow growing compared with the progenies from open pollination of the same trees. The *Picea Abies* experimental series organised by S y l v e n (1910) revealed that the inferiority is lasting and very considerable (E r i k s s o n 1972). The growth of progenies from self-pollination has been only approximately a half of that of progenies from open pollination in 60 years. A distinct inbreeding depression has been established as a rule also in other species. F r a n k l i n (1970) collected from the literature a very useful list which contains results for 35 species of the *Pinaceae* family.

If these and only these two points are taken together, the immediate conclusion is that inbreeding depression retards the growth of natural forests. If in a population the share of individual trees originating through self-pollination is tens of per cent and if, in addition, progenies from cross-breeding of near relatives are dominant in the rest of the population, the inbreeding coefficient must be fairly high. Substitution of cross-breeding for inbreeding appears to be a simple and effective tree-improvement method in this situation. However, there is a weak point in this line of thought. If inbreeding dominates, a great proportion of the loci are obviously homozygous. How is it possible then to produce a great difference between progenies from controlled self-pollination and from open pollination?

Conifers have no mechanism that inhibits self-fertilization. There are, however, many phases between the pollination of female flowers and the sapling stage of the next generation during which the ratio of self-fertilization to cross-breeding may change. Calculations of the proportion of self-fertilization cannot be based simply on the proportion of pollination resulting from own pollen. Pollination of ovules is itself another matter than pollination of female flowers. Usually only the pollen grains that have reached the pollen chambers of ovules can participate in fertilization. An obvious possibility of favouring foreign pollen is associated with the pollination of ovules (in more detail in e.g. Sarvas 1962, pp. 125—126).

The amount of full seeds has been much smaller in controlled self-pollinations than in cross-pollinations and open pollinations (see Franklin 1970). This has been attributed to the fact that self-fertilization produces mostly empty seeds, which must mean a considerable decrease in the number of individual trees originating through self-fertilization. Plants originating from selfing often display various defects and disturbances which result either in death or retarded growth. Slow growth causes plants originating from selfing a subordinate position in nature in the competition with plants originating from cross-breeding. The chances of surviving the seedling stage are essentially smaller for individuals from selfing than for cross-bred seedlings. The defects commonly encountered in seedlings originating from selfing, such as albinism, were attributed from the outset to the homozygosity of recessive genes. Orr-Ewing (1957) was the first to show with *Pseudotsuga Menziesii* that the formation of empty seeds following self-fertilization is also due to the homozygosity of recessive lethal genes.

The term genetic load is employed in the present work to denote the bulk of recessive genes that are carried along in the gene pool of the population and which as homozygotes cause non-viability or defectiveness of the individual tree. The genetic load and its role are examined especially from the point of view of the effect on the proportion of inbreeding in the population. The study is based primarily on representatives of the *Pinaceae* family that grow naturally in Finland, that is, *Picea Abies* (L) Karst and *Pinus sylvestris* L with which crossings have been made since 1967. It was necessary later to enlarge the study to cover other species for which results of other kinds, too, are to be expected. Other species have been studied in Finland in stands grown for experimental purposes or in graft collections. Among other tree species, preliminary results were obtained for the present study for *Picea Omorica* (Pančić) Purk. and *Pinus Peuce*. Griseb.

2. SELF-POLLINATION AND SELF-FERTILIZATION

An essential feature of flowering is pollination of the female strobili. Only then can the machinery of sexual reproduction function. The way in which pollen enters the female flowers and where it comes from are secondary matters. The possibility of recombinations associated with sexual reproduction can be realised only by cross breeding, which requires the dispersal of pollen from one individual tree to another. Plants are incapable of active transfers — they require the help of an external factor. Cooperation with the external factor must function so that 1. the female flowers are pollinated sufficiently, 2. self-pollination does not preclude cross breeding and 3. different species do not interfere with one another's breeding.

Dispersal of pollen in conifers is an anemophilous process. Wind pollination is by no means a perfect method. The route of a pollen grain that has started to travel is quite haphazard and the probability of its impact on a female strobilus is very low. To offset the small probability there must be an immense surplus of pollen grains compared with the number of ovules. The success of wind pollination depends on weather conditions, although the same is true also of entomophily. The transport of pollen is canalised in insect pollination at least to some extent in that certain insects specialise in certain plant species. In anemophily extensive and fairly pure plant associations of the same species may help to keep within the same species. The pollen grains of foreign species may be detrimental to intra-specific crossing if great quantities of them find their way into female flowers.

What are the pros of anemophily to effset these cons? They must exist, as wind pollination is the crossing system of many plant species. One advantage, surely, is that no insects are necessary. Where could the enormous numbers of insects be found that are necessary for the pollination of vast areas of forest? Secondly, wind pollination provides good conditions for effective gene flow even within a broader range (K o s k i 1970).

Sufficient pollination of female strobili is a matter open to interpretation. Complete pollination means that every ovule in every inflorescence is pollinated, but it is difficult to say whether pollination is adequate when, for instance, 50 per cent of the ovules are pollinated. No numerical limit can

be set for sufficient pollination, but the requirement must be high judging by the material supplied by the trees themselves. According to Sarvas (1962, pp. 112—113), 70—80 per cent of the ovules are pollinated after relatively abundant pollination.

The impacts of individual pollen grains on female strobili and ovules are independent of one another, that is the impact of a pollen grain on a known ovule does not depend on whether the ovule is or is not already previously pollinated. Let us think of a female strobilus, where one part of ovules have already been pollinated, and of a pollen grain entering the strobilus. The higher the proportion of pollinated ovules, the lower is the probability of the pollen grain pollinating a »virgin» ovule. However, the probabilities of multiple pollination and non-pollination are incalculable for the direction of arrival is governed by the wind and is not of equal value for ovules on different sides of the round female flower (Sarvas 1962, p. 73). In a simplified situation in which all places are assumed to be of the same value, it is possible with the Poisson distribution to calculate the probability of an impact of a new place (see Gregory 1961, p. 164). A simplified model of this kind shows that the required number of pollen grain impacts soon becomes very great on approaching complete pollination. In nature's pollination process several thousands of pollen grains reach the female strobilus of *Pinus sylvestris* and tens of thousands impact the large female strobilus of *Picea Abies*. The estimates are based on the measured pollen catch which, according to Sarvas (1962 and 1968), is 200 grains/sq.mm.

In considering the amount of pollen needed for adequate pollination it must be remembered that not even all pollen grains drifting towards the female flower can possibly impact it. As wind cannot blow through the female strobilus, swirling eddies arise around it, taking a part of the pollen grains with them. The present author (Koski 1968) estimated the efficiency of trapping (E) to be about 60—70 per cent on the basis of the size of the female strobili and the pollen grains and the average wind velocities (see Gregory 1961). Hence, over 1 400 approaches are needed for, for instance, 1 000 impacts. Pollen reaches the female strobilus only by chance. Consequently, there must be approximately equally much pollen everywhere in the stand so that the female flower in any place whatever is pollinated. A huge number of pollen grains is required to achieve such a situation. The pollen quantities established in nature, which are of the magnitude 10^{12} grains/hectare, can well be understood against this background.

The low velocity of sedimentation of pollen grains and their great number result in their relatively widespread dispersal. For crossing, this means that the pollen admixture at any point in the forest contains pollen of very many trees, not just of a single tree or a few individuals.

Study of the composition of pollination must start from the assumption that the impact on the female strobili by pollen grains is a random phenomenon. The tree's own pollen has an equal chance of reaching a strobilus as the pollen of a foreign tree. Thus, different trees participate in the pollination of the strobili of a certain tree in ratio to the number of their pollen grains in the vicinity of receptive inflorescences. Decisive for self-pollination is the proportion of own pollen in all pollen. An extreme case is a solitary

tree around which there is only its own pollen. Pollination is then, of course, only with own pollen. Another extreme case is a tree with solely female flowers and no pollen-producing male flowers. Pollination is then solely by the pollen of other trees. The former case, complete self-pollination, is rare in the natural state, but artificially frequent when representatives of a foreign tree species are planted singly, e.g. for ornamental purposes. The latter case, on the other hand, is fairly common in nature, usually occurring in a certain phase of development when the flowering of trees is confined to female flowering alone. It is thus possible in these cases to find with little trouble material in which the proportion of self-pollination was either 100 or 0 per cent.

In principle, the proportion of self-pollination in the open pollination of an adult stand is determined in the same way. It depends on the relation between the densities of own and foreign pollen at the time of pollination. The densities of own and foreign pollen vary widely in different situations.

The density of own pollen depends almost solely on the profusion of male flowers in the tree. A general trend in the abundance of anthesis is its increase with the age and size of individual trees. However, there are very great genetic differences in the extent of anthesis between individual trees. Site factors affect the scale of anthesis, and there are also great annual differences in the abundance of male flowers. It is hardly possible to calculate the average density of pollen grains originating from the tree itself around the female flowers. It is known, however, that the change in the density of pollen grains discharged from a point source follows fairly closely over short distances the expression $D \propto x^{-1.75}$, where D denotes density, $\propto$ »is proportional to» and x = distance. However, it is difficult to measure the momentary density of pollen shed by the anthers, and there are a great many male flowers at varying distances from each strobilus. Tempting though it would seem to perform a purely mathematical calculation of the probability of self-pollination, anyone who attempts it will soon realise the great difficulties involved. In addition, it is quite obviously to be expected that such great variation will occur in the probability of self-pollination that no universally applicable mean can be obtained from such a calculation.

The situation is a little simpler in regard to foreign pollen in mature stands. The author has reported earlier (K o s k i 1970) that the density of a pollen cloud is low in small isolated stands. The proportion of self-pollination reaches a high level in such stands, in e.g. cultivations of exotic tree species. When the stand size increase — up to some 20—30 hectares — the density of the pollen cloud rises in ratio to the area of the stand and, correspondingly, the proportional density of own pollen decreases.

The proportion of own pollen in total pollination has been studied by different methods in *Pinus sylvestris* stands. Sarvas, (1962), compared the proportion of unpollinated ovules in emasculated sample trees and untreated control trees of the same stand and found the average proportion of self-pollination to be 27 per cent. The present author (K o s k i 1970) used pollen labelled with radioactive phosphorus isotope P^{32} to determine the proportion of self-pollination. The proportion of own pollen varied over the the range 2.5—11.7 per cent in one and 12.9—24.4 per cent in another sample tree. S t e r n (1972) used manganese for labelling. It was then activated in pollen samples for identification of the pollen. He found that the proportion of own pollen was as much as 85 per cent in some cases. In the comparison of Stern's result with values previously reported in Finland it should be noted that the measurements were made in differing conditions. Stern also emphasised strongly that the proportion of self-pollination is proportional to the amount of the anthesis of the tree in question.

The use of labelled pollen for these studies gives the impression of being a very elegant and exact method. However, a number of technical difficulties and sources of error attach to this technique. The most serious is perhaps that identification of a labelled pollen grain rests in many a case on subjective evaluation. As there are many borderline cases, even a small unconscious bias on the part of the researcher changes the result. The origination of borderline cases, again, is due to failure to distribute the labelling agent evenly between the different parts of the crown of the tree and all the pollen grains (K o s k i 1970, S c h m i d t 1970, M c E l w e e 1970). In activation analysis, which the author has also experimented with, the difficulty is that not only the labelling agent but also the other elements in the sample are activated. Activation of other substances results in blackening on the autoradiograms of almost all bodies, also unlabelled pollen grains (S c h m i d t 1970, p. 26). The investigator is then faced with the necessity of basing his choice on the magnitude and intensity of the blackening. Labelling pollen by the isotope technique also involves the limitation that it is impossible to analyse the pollination of the female flowers and ovules themselves. The labelling substance cannot be directed only to anthers; the whole tree is always labelled at the same time. The composition of pollination can be assessed only from samples collected in some kind of trap. The method is so laborious and expensive that it is generally not possible to include many trees in the examination or to repeat the measurements in different years. A clear distinction must be made at least with spruce and pine between the total pollen catch as verified by pollen samplers and the pollination of ovules. As the receptive period and volume of pollen chambers are limited, pollen grains coming from different sources do not necessarily

enter the pollen chambers in ratio to their presence in total pollination. It is especially significant that in a situation where foreign pollen is available the time factor obviously favours cross-pollination (S a r v a s 1962, p. 126). It is thus to be expected that among the pollen grains finally participating in the fertilization proper the proportion of own pollen of each tree is distinctly smaller than the total pollen catch of the pollen samplers.

So-called genetic markers of different types offer an excellent medium for the study of the relative proportion of own pollen in the pollination ovules, that is, study of the role of self-fertilization. Various colour defects are fairly common in conifers. These properties can be attributed to the homozygosity of recessive defective genes. Colour defects are therefore encountered expressly in progenies originating from selfings. The numerical ratios between anomalous seedlings and normal seedlings merit some attention. If the deviation, e.g. albinism, is assumed to be due to a single pair of genes, it is naturally presumable that after selfing 25 per cent of the progenies will be deviants. However, the exact numerical ratio 1 : 3 has been obtained only rarely in selfing experiments with conifers. Yet, there are several explanations for this divergence from expectations. Firstly, the progenies originating from selfings are generally very small and therefore the percentages that can be calculated from these progenies vary appreciably for random reasons. Secondly, a possible explanation is that the combined effect of two or more genes is necessary for the appearance of that quality and then too, the expectation, is less than 25 per cent. A third possible explanation, advanced by S o r e n s e n (1966), is based on the linkage of genetic markers and embryonic lethals in the chromosome set. Two recessive genes, an embryonic lethal (l) and a colour defect, e.g. albino (a), located in the same chromosome, cause varying albino-normal ratios owing to the cis to trans position and the distance between the loci in question. Let us assume that the distance between loci l and a is $2z$ crossing-over units. There then arise in meiosis cross-over chromatids in which the exchange of parts has occurred between l and a, two types each with the frequency z. When recessive alleles are in the cis position (Fig. 1 a) different gametes originate in meiosis in the following manner:

Type of gamete		Frequency	symbol used later
non crossover	a l	$0.25 + (0.25 - z) = 0.50 - z =$	v
	A +	$0.25 + (0.25 - z) = 0.50 - z =$	v
crossover	a +	$z =$	z
	A l	$z =$	z

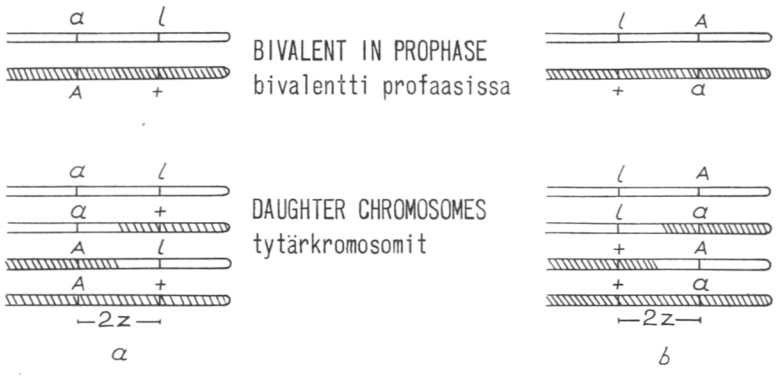


Figure 1. Meiosis in case of linkage between a genetic marker, albinogene (a) and an embryonic lethal (1) schematic. In a) recessive alleles originally in cis-position, in b) in trans-position. The distance between the two loci is denoted with 2 z.

Kuva 1. Kaavakuva meioosista, kun albiinogeeni (a) ja alkioletaali (l) ovat kytkeytyneet, osakuvassa a) resessiiviset alleelit alussa cis-asemassa, osakuvassa b) trans-asemassa. Lokuksien välimatka on merkitty 2 z:lla.

The following combinations result from selfing:

	Gametes ♀ \ ♂	*a l* *v*	*A +* *v*	*a +* *z*	*A l* *z*
Genotype	*a l*	*aa ll*	*Aa + l*	*aa + l*	*Aa ll*
Frequency	*v*	v^2	v^2	vz	vz
Phenotype		LET.	NORM.	ALB.	LET.
Genotype	*A +*	*Aa + l*	*AA ++*	*Aa ++*	*AA + l*
Frequency	*v*	v^2	v^2	vz	vz
Phenotype		NORM.	NORM.	NORM.	NORM.
Genotype	*a +*	*aa + l*	*Aa ++*	*aa ++*	*Aa + l*
Frequency	*z*	vz	vz	z^2	z^2
Phenotype		ALB.	NORM.	ALB.	NORM.
Genotype	*A l*	*Aa ll*	*AA + l*	*Aa + l*	*AA ll*
Frequency	*z*	vz	vz	z^2	z^2
Phenotype		LET.	NORM.	NORM.	LET.

Phenotypes that contain a viable combination originate as follows:

NORMALS $3v^2 + 2z^2 + 4vz = 2(v + z)^2 + v^2 = 0.5^2 + v^2 = 0.25 + v^2$

ALBINOS $z^2 + 2vz$

TOTAL $2(v + z)^2 + v^2 + 2vz + z^2 = 3(v + z)^2 = 3 \cdot 0.25 = 0.75$

The frequency of albino seedlings is thus obtained from the expression

$$\frac{z^2 + 2vz}{0.75}$$

If $z = 0.05$ the frequency expectation is $\frac{0.05^2 + 2 \cdot 0.45 \cdot 0.05}{0.75} = 0.048$

Different types of gametes originate in the following way in the trans position (Fig. 1 b):

Type of gamete		Frequency	symbol used later
non crossover	a+	$0.25 + (0.25 - z) = 0.5 - z =$	v
	A l	$0.025 + (0.25 - z) = 0.5 - z =$	v
crossover	a l	$z =$	z
	A+	$z =$	z

The following combinations result from selfing:

	Gametes ♀ \ ♂	$a+$ v	$A\,l$ v	$a\,l$ z	$A+$ z
Genotype	$a+$	$aa++$	$Aa+l$	$aa+l$	$Aa++$
Frequency	v	v^2	v^2	v^2	v^2
Phenotype		ALB.	NORM.	ALB.	NORM.
Genotype	$a\,l$	$Aa+l$	$AA\,ll$	$Aa\,ll$	$AA+l$
Frequency	v	v^2	v^2	v^2	v^2
Phenotype		NORM.	LET.	LET.	NORM.
Genotype	$a\,l$	$aa+l$	$AA\,ll$	$aa\,ll$	$Aa+l$
Frequency	z	v^2	v^2	z^2	z^2
Phenotype		ALB.	LET.	LET.	NORM.
Genotype	$A+$	$Aa++$	$AA+l$	$Aa+l$	$AA++$
Frequency	z	v^2	v^2	z^2	z^2
Phenotype		NORM.	NORM.	NORM.	NORM.

The origination of albinos from phenotypes that contain a viable combination is $v^2 + 2\,vz$. The frequency expectation for albino seedlings is obtained from the expression $\frac{v^2 + 2\,vz}{0.75}$

A numerical example: if $z = 0.05$ the frequency expectation of albinos is $= \frac{0.45^2 + 2 \cdot 0.45 \cdot 0.05}{0.75} = 0.33$

Table 1. *Picea Abies.* The frequency of colour deviants following selfing and open pollination in the progenies of trees heterozygous for a defective gene.
Taulukko 1. Picea Abies. Poikkeavan väristen sirkkataimien osuus defektigeenin suhteen heterotsygoottisten puiden itsepölytys- ja vapaapölytysjälkeläistöissä.

No. of the tree	Self-pollination			Open pollination			Selfing %
	Deviant seedlings, number	Total of seedlings	Deviants %	Deviant seedlings, number	Total of seedlings	Deviants %	
Tuusula	Year of flowering 1967, growing 1968						
2	1	90	1				
8	2	98	2				
16	4	92	4				
22	1	28	4				
23	27	136	20	16	1 292	1.24	6
25	3	29	10				
28	1	34	3				
Punkaharju							
LII-6	13	71	18	19	2 338	0.81	4
LII-39	20	81	25	19	2 624	0.72	3
LII-44	7	112	6				
E 3382	23	212	11	1	365	0.27	3
E 3388	18	141	13	14	1 352	1.04	8
E 3436	5	24	21	8	366	2.18	10
Tuusula	Year of flowering 1968, growing 1969						
23	5	26	19				
30	10	38	26				
32	17	130	13				
Tuusula	Year of flowering 1969, growing 1970						
15	47	282	17				
32	120	860	14				
Korso							
22	178	1 011	17				

The foregoing analysis shows that deviation from the segregation ratio 1 : 3 can be explained easily also by the linkage of colour defect gene and embryonic lethal. This explanation does not, of course, rule out more complex explanations about the joint effect of several colour defect genes on the origination of a marker trait. Linkage can explain the higher frequencies than 0.25 which are also encountered (see Table 2). As the average number of embryonic lethals is nine per tree (pp. 19 and 22) and the haploid chromosome number $n = 12$, the colour defect and the embryonic lethal must often coincide in the same chromosome provided that they are not grouped in certain chromosomes.

The system of several archeogonia and polyembryony in conifers in the same ovule does not affect the segregation ratios of embryonic lethals and genetic marker in the progeny. The appearance of colour defect after selfing

Table 2. *Pinus sylvestris.* The frequency of colour deviants following selfing and open pollination in the progenies of trees heterozygous for a defective gene.

Taulukko 2. Pinus sylvestris. Poikkeavan väristen sirkkataimien osuus defektigeenien suhteen heterotsygoottisten puiden itsepölytys- ja vapaapölytysjälkeläistöissä.

No. of the tree	Self-pollination			Open pollination			Selfing %
	Deviant seed-lings, number	Total of seed-lings	Deviants %	Deviant seed-lings, number	Total fo seed-lings	Deviants %	
	Grafts of plus trees, flowering in 1968, growing in spring 1970						
E 2	7	32	22				
E 104	5	20	25				
E 245	4	19	21				
E 355	11	29	37				
E 367D	7	32	22				
E 641	4	25	16				
K 48	2	25	8				
P 321	5	32	16				
	Grafts of plus trees, flowering in 1969, growing in spring 1971						
E 111	2	90	2				
E 113	2	25	8				
E 281	7	89	8				
E 355	18	89	20				
E 361	1	68	2				
E 610	9	30	30				
E 615B	15	56	27				
E 641	14	55	25				
	Tuusula, research stand, flowering in 1970, growing in spring 1972						
46	86	227	38	5	235	2.1	6

occurs with exactly the same probability after self-pollination and self-foreign mixed pollination. It is therefore possible to study the proportion of self-fertilization after open pollination by comparing the frequency of deviant seedlings among the open pollination progeny with the frequency of deviant seedlings obtained through self-pollination. This comparison must, however, be within individual trees as it cannot be assumed that the frequency of deviant seedlings in complete self-fertilization is 0.25.

The following tables present results for the frequencies of seedlings with colour defects in the self- and open pollination progenies of the sample trees. The tables include only the mother trees in whose progenies deviant seedlings are encountered. The deviations are not the same in all progenies, but vary from a full albino to yellow which later turns green. Free pollination progenies were included only when they numbered at least a couple of hundred. The number of progenies originating from selfing is generally low as the proportion of filled seeds is very small. It naturally follows from this that the statistical significance of the frequencies of deviant seedlings is modest.

The proportion of deviant seedlings varies in the different self-pollination progenies within the range 1—38 per cent. The reasons for the varying segregation relations were discussed in the foregoing (see also Sorensen 1966). In the few cases in which there are results for two years from the same tree, the proportion of deviant seedlings was roughly the same in both years.

Diallel cross was performed in 1970 between the sample trees in the Tuusula experimental spruce stand: trees that had produced deviant seedlings were inter-crossed. The combinations are presented schematically here. The number in the square denotes the number of seedlings obtained from the crossings.

♀ \ ♂	2	8	16	22	23	25	28
2		73	98	101	8	3	12
8	97		101	99	95	97	103
23	92	99	85	97		102	92
25	100	100	103	80	9		10
28	6	29	39	26	20	2	

All seedlings were of normal colour. This suggests that the colour-defect genes of individual trees are not in one and the same locus.

From the last column of Table 1 we obtain for six progenies 6 per cent as the mean of the proportion of self-fertilization. Table 3 compares this value with results for other species of the *Pinaceae* family.

Table 3. Proportion of self-fertilization in a stand after open pollination
Taulukko 3. Itsehedelmöityksen osuus metsikössä vapaapölytyksen jälkeen.

Species	Calculated proportion of self-fertilization	Source
Pinus elliottii	6 %	Squillace ja Kraus 1963
Pinus radiata	10 %	Bannister 1965
» »	under 10 %	Fowler 1965
Pinus taeda		
upper crown	7 %	Franklin 1971
lower crown	34 %	Franklin 1971
Pinus sylvestris	9 %	Eiche 1955
Picea Abies	6 %	own material
» » northern timber line	2.5 %	Malmivaara, manuscript

The results for the different species of trees and different conditions are very consistent. A general observation that can be inferred from them is that the share of self-fertilization in a stand is about 10 per cent on average. This is considerably lower than estimates of the proportion of own pollen in the total pollination of femal strobili. The combined effect of the limited volume of the pollen chamber and the time difference in the inception of male and female Flowering has reduced the proportion of own pollen roughly by a half. It is quite evident that the share of foreign pollen in the pollination of trees that grow singly or in small groups is always smaller than in a stand and that the majority of fertilizations, too, thus become self-fertilizations.

3. EMBRYONIC LETHALS

A dominating feature in the numerous controlled self-pollination experiments with conifers is the very pronounced decrease in the proportion of filled seeds compared with the results for cross pollination or open pollination. The differences between individual trees and even tree species are considerable, but the amount of filled seeds is generally only about 10 per cent of the amount of full-sized seeds. Empty seeds originate in conifers for a variety of reasons. However, the fact that the proportion of empty seeds is highest after self-pollination shows that genetic factors are the most important reason for the origin of empty seeds. Several authors have observed in different tree species (Orr-Ewing 1957 *Pseudotsuga menziesii*, Mergen & al. 1965 *Picea glauca*, Hagman and Mikkola 1963 *Pinus peuce*, Sorensen 1969 *Pseudotsuga menziesii*, Koski 1971 *Picea Abies* and *Pinus sylvestris)* that the critical moment does not occur until after syngamy.

The proportion of empty seeds after controlled selfing in the tree species for which more comprehensive materials are available are listed in the following table.

Table 4. Empty seed percentages in controlled self-pollinations.
Taulukko 4. Tyhjäsiemenprosentti valvotun itsepölytyksen jälkeen.

Tree species	Sample trees, number	Empty seeds % average	Range of variation %	Source
Picea abies	87	86.2	43—100	author's crossings
Picea Omorica	13	60.0	24—95	author's crossings
Pinus sylvestris	14	72.5	34—94	Hadders, 1971
	21	86.6	58—99	Johnsson, 1972
	127	83.3	34—99	author's crossings
Pseudotsuga menziesii .	35	92.1	69—100	Sorensen, 1971
Pinus peuce	7	38.7	25—88	author's crossings

As the empty seed percentage of individual trees after self-pollination varies considerably, the result for a few individuals cannot be taken as a representative indicator of the entire tree species. It can be seen from the table that the mean empty seed percentage after self-pollination is very similar for spruce, pine and Douglas fir. Yet even they have individual

trees from which more than a half of the seed crop is filled also after selfing. It has long been known that self-pollination produces a greater amount of filled seeds in *Picea Omorika* than in e.g. *Picea Abies*.

The route that leads from self-pollination to empty seeds is no different from the normal until after fertilization. At least three different explanations have been proffered for the series of events that lead to embryonic lethality and, in this way, to the production of an ampty seed. Stern (1968) based his theory on incompatibility of the embryo and the endosperm. Another explanation, advocated by e.g. Sorensen (1971), is based on so-called lethal equivalents. This means that detrimental gene effects are enriched in zygotes during self-fertilization and their combined action causes the death of the individual. The author (Koski 1971) introduced a third alternative which does not presuppose the existence of actual »lethal» genes. In this theory, so-called embryonic lethals might be simply gaps or errors in the code series which are necessary for the development of an embryo. If such a defect or error becomes homozygous, embryonic development cannot continue beyond a certain phase and the death of the individual ensues. It as also relatively easy according to this model to estimate from the empty seed percentage that follows selfing how many different embryonic lethals (in different loci) the said individual has as heterozygote (Bramlett and Popham 1971, Koski 1971).

The author (Koski 1971) recently presented estimates of 9.4 embryonic lethals as the mean and 2—20 as the range for 80 South Finnish *Pinus sylvestris* plus trees. A somewhat more comprehensive material of 127 trees, including the above, is now available. It comprises 100 plus trees from different parts of Finland and 27 sample trees chosen at random from a single stand. The distribution of these trees according to the estimated number of embryonic lethals is as follows:

Embryonic lethals number	1—3	4—6	7—9	10—12	13—15	16—18	19—21
Trees, number	6	29	46	28	9	8	1
%	4.7	22.8	36.2	22.0	7.1	6.3	0.8

This material gives 8.9 as the average number of embryonic lethals, 0.5 less than for the former material of 80 plus trees. The decrease is explained by the fact that the mean for the randomply selected sample trees is a little lower than the mean of the plus tree sample. The sample taken from the stand is so small, however, that it cannot be regarded as certain whether the plus trees have on average more embryonic lethals than the randomly selected trees.



Figure 2. Controlled crossings in *Picea Abies* have mostly been done on the tree tops of research stands, usually 25—30 meters above the ground. For the sake of certainty the tree tops have been reinforced with a pole and stayed in three directions. The pole has steps of steel rod.

Kuva 2. Kuusella valvotut risteytykset on enimmäkseen tehty tutkimusmetsiköiden puiden latvoissa 25—30 m:n korkeudessa. Työturvallisuutta varten puiden latvat on vahvistettu tukiriuuilla ja kiinnitetty haruksilla kolmeen suuntaan. Tukiriuuissa on teräksiset askelmat.



Figure 3. Controlled crossings in *Pinus sylvestris* can be done in grafts in seed orchards and tree banks. The low number of seeds per cone must be compensated with a large number of isolation bags.
Kuva 3. Männyn risteytykset voidaan tehdä maasta käsin siemenviljelysten ja kokoelmien vartteisa· Kun yhdestä kävystä tulee vain muutama siemen, täytyy pusseja olla paljon.

Picea Abies differs slightly from *Pinus sylvestris* in its seed development phenomena. For studies of this kind, the difference arises because non-pollinated ovules of spruce do not remain regularly smaller in size and thus easy to distinguish from pollinated ovules, as is the case with pine. Even a non-pollinated spruce ovule may grow to the archegonial stage like pollinated ovules. After this, however, the development of these ovules ceases and the endosperm degenerates. The result then is a full-sized empty seed. Experience suggests that there is no great regularity in the ceasing of the development of a non-pollinated ovule. Non-pollinated ovules which have developed to differing sizes may be encountered even in the same partly pollinated cone. There are in addition the differences between individual trees and years. As the proportion of empty seeds in the lots studied is determined from roentgenographs, non-pollinated seeds are also included in the category of empty seeds of *Picea Abies*. This means, naturally, that the importance of embryonic lethals is over-estimated. Because of this source of error the author did not publish the material of *Picea Abies* in his presentation of the method of evaluating the number of embryonic lethals (K o s k i 1971).

However, the fact that the natural seed crop of *Picea Abies* has much greater amounts of empty seeds than the seed crop of Scots pine motivates an attempt to explain this difference by means of embryonic lethals. Data on the empty seed percentage of spruce have been reported by e.g. Heikinheimo (1937), an average of 45.2 per cent; Anderson (1965, pp. 178—179), 38—72 per cent; and Sarvas (1968), 66.5 per cent. According to Sarvas (1962, p. 133), the average empty seed percentage for pine in Finland was only 13.7 ± 4 per cent. Some earlier estimates (Martshenko 1912 (cit. Sarvas p. 170) 18 per cent and Jurkevitsh — Lubjako — Krugilov 1940 (cit. Sarvas 1962 p. 170) 14.9—15.8 per cent) are fairly close to the estimate presented by Sarvas, whereas the 20—30 per cent reported by Schmidt in Germany is higher. All these percentages are distinctly smaller than the above figures for *Picea Abies*. This difference is difficult to explain on the grounds that self-fertilization is more common in spruce than pine, as the estimates of the role of selfing obtained by genetic markers do not seem to be higher on average for spruce than for pine. Another dossible explanation might be the greater number of embryonic lethals per individual tree for spruce was estimated than for pine. To clarify this question, the number of embryonic lethals from the empty seed percentage obtained in controlled self-pollination (Bramlett and Popham 1971, Koski 1971). The number of fertilizations was assumed to be 2 per ovule. The sample trees were distributed as follows according to the number of embryonic lethals:

Embryonic lethals number	1—3	4—6	7—9	10—12	13—15	16—18	19—21
Trees number	2	20	21	27	8	7	2
%	2.3	23.0	24.1	31.1	9.2	8.0	2.3

The average number of embryonic lethals per tree is 9.6. The corresponding mean for pine according to the compilation is 8.9. The difference between pine and spruce in the number of embryonic lethals is so small that it cannot explain the differences in the empty seed percentages after open pollination.

If it is assumed that trees in natural populations contain embryonic lethals in the same ratio as the sample trees studied, it is possible to calculate the probability of the destruction in the course of embryonic development of an embryo that has originated through self-fertilization. The probability of a lethal combination for the mean of each class can be taken from the

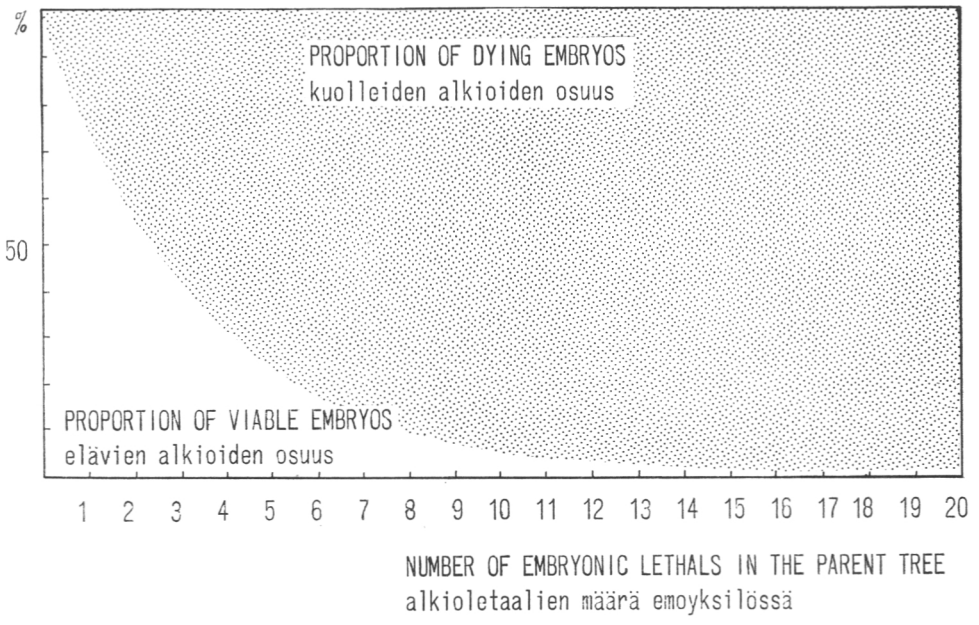


Figure 4. Effect of embryonic lethals on the elimination of ovules originating through self-fertilization.

Kuva 4. Alkioletaalien vaikutus itsehedelmöityksestä syntyneiden alkioiden eliminoinnissa.

formula published by e.g. the author (K o s k i 1971, p. 10), in which $k = 1$. When these probabilities are multiplied by the corresponding frequency values for the classes, we obtain the following:

Pinus sylvestris:

$$P = 4.7 \times 43.7 + 22.8 \times 76.3 + 36.2 \times 90.0 + 22.0 \times 95.8 + 7.1 \times 98.2 + 6.3 \times 99.2 + 0.8 \times 99.7 = 87.1\ \%$$

Picea Abies:

$$P = 2.3 \times 43.7 + 23.0 \times 76.3 + 24.1 \times 90.0 + 31.0 \times 95.8 + 9.2 \times 98.2 + 8.0 \times 99.2 + 2.3 \times 99.7 = 89.3\ \%$$

According to this calculation, an embryo of both pine and spruce that has originated through self-fertilization is eliminated with a probability of nearly 90 per cent before the seehd as matured.

Picea Omorica and *Pinus peuce* which in Finland grow as cultivated species only both have a fairly limited natural area of distribution today, *Picea Omorica* has been regarded of old as a self-fertilizing conifer. Table 5

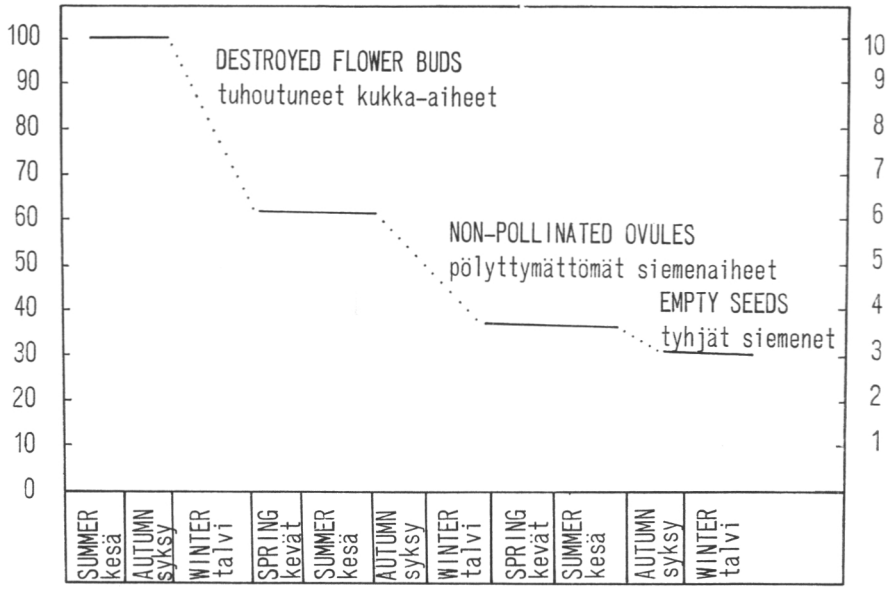


Figure 5. *Pinus sylvestris.* Schematic representation of the average decrease in the seed crop in South Finland. Based on values published by S a r v a s (1962 and 1970). On the horizontal axis the time and changing of seasons. On the vertical axis, left, the per cent scale, on the right the seed crop in kg/hectare per annum in a stand in which the dominant height is 24 m. Empty seeds are of fairly small significance.

Kuva 5. Pinus sylvestris. Kaavamainen esitys potentiaalisen siemensadon keskimääräisestä vähenemisestä Etelä-Suomessa. Perustuu S a r v a k s e n (1962 ja 1970) julkaisemiin arvoihin. Vaaka-akselilla vasemmalla prosenttiasteikko, oikealla siemensato laskettuna kg/ha vuodessa metsikössä, jonka valtapituus on 24 m. Tyhjät siemenet mekitsevät varsin vähän.

shows the results obtained up to the present for 12 sample trees. As expected. the empty seed percentage after self-pollination is smaller than for *Picea Abies* and *Pinus sylvestris*. The number of embryonic lethals in the sample trees was also estimated in the way described earlier from the empty seed percentages. The estimates are naturally again smaller than for *Picea Abies* and *Pinus sylvestris*. The empty seed percentage in open pollination, i.e. 47,7, is on the other hand of the same magnitude as for *Picea Abies* on average. The stands in which the sample trees grow are very small and pollination is consequently poor (K o s k i 1970, p. 35). It should be mentioned that the cross pollinations performed gave exactly the same empty seed percentage as controlled self-pollinations. This must be interpreted to mean that the hybridisation technique employed increases in one way or another the proportion of empty seeds. Lower empty seed percentages are to be expected even after self-pollination with an improved crossing technique. This may be assumed to happen because a greater number of filled

seeds originates after open pollination, however inadequate it may be, than after controlled cross pollinations.

Pinus peuce is a new species in conifer self-pollination experiments. Table 6 shows that at least with the seven sample trees used self-pollination gave the best of the results achieved up to the present. The share of empty seeds is of the same magnitude as with *Pinus sylvestris* after open pollinatio, despite the fact that *Pinus peuce*, too, grows in a fairly small stand. Controlled cross pollination gave more empty seeds than controlled self-pollinations. This result must again be attributed to an inadequate crossing technique.

The data on *Picea Omorica* and *Pinus peuce* are derived from just a few sample trees which are growing cultivated far outside their natural area of distribution. The results as such cannot therefore have general application to these tree species as a whole.

Table 5. *Picea Omorica*. Empty seed percentage and estimated number of embryonic lethals in sample trees.

Taulukko 5. Picea Omorica, tyhjäsiemenprosentti ja arvioitu alkioletaalien määrä koepuissa.

Number of tree	Self-pollination			Open pollination	
	Seeds examined	Empty %	Estimated number of lethals	Seeds examined	Empty %
Punkaharju, crossing 1971					
1	300	64.7	4	301	57.1
2	300	47.3	3	300	46.0
3	300	60.3	4	300	65.3
10	300	34.3	2	280	21.8
11	300	66.3	4	—	—
12	300	59.0	4	300	22.0
13	300	56.0	4	301	44.5
14	301	84.4	7	300	45.0
Tuusula, crossing 1971					
Ru 47	300	95.3	12	—	—
Ru 48A	160	78.1	6	—	—
Ru 46	300	42.3	3	344	43.3
Punkaharju, crossing 1972					
13	73	95.9	(12)	—	—
14	885	96.6	12	—	—
16	323	65.9	5	656	83.9
Arithmetic mean of the trees		67.6 %			47.7

Table 6. *Pinus Peuce*, Tuusula, crossing 1971. Empty seed percentage and estimated number of embryonic lethals in sample trees.

Taulukko 6. Pinus Peuce, Tuusula, risteytys 1971. Tyhjäsiemenprosentti ja arvioitu alkioletaalien määrä koepuissa.

Number of tree	Self-pollination			Open pollination	
	Seeds examined	Empty %	Estimated number of lethals	Seeds examined	Empty %
E 1940	200	46.0	3	300	13.3
E 2401	96	26.0	2	58	10.3
E 2403	997	87.9	9	500	22.4
E 2404	870	27.9	2	400	7.6
E 2412	1 000	29.1	2	400	10.0
E 3508	509	25.5	2	198	11.5
E 3510	800	28.5	2	400	26.8
Arithmetic mean of the trees		38.7			16.4

4. GENETIC LOAD IN GERMINATION AND LATER STAGES

The inferiority of the seedlings from self-pollination compared with those from cross pollination and the defects, weak points, of various kinds that appear in self-pollination seedlings have been established in numerous experiments (see F r a n k l i n 1970). In natural regeneration all manner of weaknesses and slowness of development of self-pollination seedlings tend to reduce their chances of survival in the fierce competition between seedlings. It was not possible to make an assessment of the competitive situation in this connection. A couple of experiments were arranged to discover how much weaker the development of inbred progenies generally is compared with progenies from cross pollination in similar conditions.

The study began with the germination of seeds. Self-pollination lots from three trees of *Picea Abies* and five trees of *Pinus sylvestris* and together with them open pollination seeds collected from the same trees were germinated in a small experiment on a peat bed in a greenhouse. Before the experiment the seeds were sorted in a weight sorter to ensure that only filled seeds were included.

The germination rate of the seeds was observed at intervals of a couple of days. To compare the germination rates, the proportion of germinating seeds in each lot was calculated in per cent of the final amount of germinating seeds. When the observations were combined on frequency net paper it was possible to determine for each lot the time within which 50 per cent of the germinative seeds had germinated. The result of this calculation is presented in the following table.

The last column of the table shows that inbred seeds germinated somewhat more slowly than seeds from open pollination in most lots of this small-scale experiment, even in the favourable conditions of the hothouse. A similar observation was made when growing progeny trial lots, although there is no accurate numerical material for these.

From the same seed lots were calculated also the final germination percentage and the number of young plants that had survived the seedling stage compared with the amounts of seeds sown. These results are given in Table 8.

Table 7. The germination rate of the seeds in peat, Ruotsinkylä breeding station 1972. Growth started on June 7. The seed dated from 1971. The number of days to 50 per cent germination was calculated from the observations.

Taulukko 7. Siementen itämisnopeus turpeessa, Ruotsinkylän jalostusasema 1972, kasvatus alkoi kesäk. 7. Siemen vuodelta 1971 Havainnoista laskettu, kuinka monta päivää kuluu siihen, että 50 % itämisestä on tapahtunut.

No. of the tree	Days to 50 per cent germination		Difference, days
	Self-pollination	Open pollination	
Picea Abies, Punkaharju			
E 1492	12.0	10.0	2.0
E 3382	9.0	8.0	1.0
E 3388	10.5	10.0	0.5
Pinus sylvestris, Tuusula			
7	7.5	7.5	0.0
8	7.5	6.5	1.0
17	7.5	7.5	0.0
20	7.5	7.5	0.0
46	8.5	7.5	1.0

Table 8. Germination of seeds and survival of seedlings. Compilation of a comparison of seeds derived from self-pollination and open pollination. Ruotsinkylä breeding station, filled seeds dating from 1971 were sown on June 7, 1972.

Taulukko 8. Siementen itäminen ja taimien syntyminen. Yhdistelmä itsepölytyksen ja vapaapölytyksen jälkeen syntyneiden siementen vertailusta. Ruotsinkylän jalostusasema kylvetty 7. 6. 1972 täysiä siemeniä vuodelta 1971.

No. of thre tree	Self- pollination				Open pollination			
	Seeds number	Germination percentage	Viable seedlings, number	Seedling yield %	Seeds number	Germination percentage	Viable seedlings, number	Seedling yield %
Picea Abies								
E 1492	207	55	51	25	500	75	266	52
E 3382	500	6	15	3	500	67	289	58
E 3388	500	8	2	1	500	67	301	60
Pinus sylvestris, Tuusula								
7	391	69	246	63	500	80	376	75
8	279	80	199	71	412	96	388	94
17	157	79	122	78	236	79	178	75
20	400	70	285	71	94	87	76	81
46	247	82	114	46	238	81	181	76

A point that attracts especial attention is the low germination and seedling percentage of spruce. In the search for an explanation for the poor result, over-watering in the hothouses was considered to be a possible factor. This error caused a great difference in germination and seedling yield between

self-pollination and open pollination spruce seeds. The difference was much smaller for pine, but the germination percentage of self-pollination seeds was clearly lower for 3 trees. In a progeny seeding experiment with *Pinus sylvestris* comprising self- and open pollination progenies of 27 plus pines side by side, the percentage of viable inbred seedlings in the spring the year after seeding was 41.1 and of open pollination seedlings 52.7 of the quantity of filled seeds sown. According to these results, the germination of filled seeds from self-pollination is slower and poorer than that of seeds from cross pollination. This means that the proportion of self-fertilization decreases also in the germination and seedling phase.

Deviations in seedlings caused by the homozygosity of recessive genes have been studied fairly extensively in the *Pinaceae* family. Franklin (1970) listed in his compilation 58 cases from 14 *Picea* and *Pinus* species. The deviation was often a lethal defect, such as total albinism, sometimes subvital or transient. Genes which cause defects in seedlings as part of the genetic load of conifers differ from the embryonic lethals previously discussed in that they are not encountered in all individual trees. The majority of the sample trees treated up to the present have yielded solely normal seedlings after self-pollination, but various defects are frequent in populations.

Although defects that appear in the seedling stage are striking and fairly common, the share of defect-producing genes in the total genetic load is obviously not very great. Fifty one of the over 400 sample trees in Eiche's (1955) *Pinus sylvestris* material had a colour defect as a heterozygote. The author (Koski 1970) found that 14 of 100 sample trees were deviants by means of controlled self-pollinations. Malmivaara (manuscr.) found eight trees with deviant progeny among 48 *Picea Abies* in South Finland and 48 heterozygotes as regards colour defects among 133 sample trees collected from the timber line of spruce. Up to the present, 72 self-pollination progenies have been cultivated from *Pinus sylvestris* sample trees and 13 of them have had deviant seedlings.

The genetic background of colour defects has been studied by crossing individual trees which yield after self-pollination also seedlings with abnormal clouring. So far, 7 spruce trees from the same stand have been crossed in one direction. All these crossings gave only normal-colour seedlings. For pine, 11 different combinations have been made with 9 parent trees and all of them have given seedlings of normal colour. The number of trees studied is fairly small for the present. However, it can already be concluded that there is not one single locus but different loci behind the colour defects. This result was to be expected, of course, because it is known that the normal function of very many genes is necessary for chlorophyll synthesis.

Progenies from self-pollination are slower-growing on average than open pollination progenies of the same trees in the first years. Fifty three pairs were grown in a comparative experimental series of material collected from self-pollinations of spruce and the sample trees and the open pollination progenies of the same trees. The crossings were made in spring 1967, seedings in psring 1968. The heights of the seedlings were measured in the nursery after the first, second and third growing season. They were planted out in spring 1971, but have not yet been measured there. The growth of the seedlings is presented in the following table. In experiments 380, 381 and 382 the sample trees derive from three different stands. Table 8 and the diagram in Figure 6 show that, as expected, the open pollination lots kept ahead in growth throughout. After 3 growing seasons most of the self-pollination progenies were 25—30 per cent behind the corresponding open pollination progenies in growth. However, progenies of different parent trees behave in very different ways. These 53 pairs included six in which progenies from self-pollination grew equally well, in some cases even better than the open pollination progenies. The best self-pollination progeny is third in length and approx. 5 cm (about 16 per cent) higher than its pair.

To summarise, it may be said that the effect of self-pollination from the time of germination onwards is that the chances of survival of selfings beyond the first years of life are essentially poorer than they are for seedlings produced by cross fertilization. A considerable number of seedlings are eliminated under the influence of internal factors in experimental conditions.

Table 9. *Picea Abies.* Mean heights of seedlings in autumn 1970 from cross-fertilization progenies of 1967. Sown in spring 1968, transplanted in autumn 1968, planted out in spring 1971.

Taulukko 9. Picea Abies. Taimien keskipituudet syksyllä 1970 vuoden 1967 risteytysjälkeläistöissä. Kylvetty kev. 1968, koulittu syks. 1968, istutettu maastoon kev. 1971.

Measured in the autumn	Self-pollination seedlings		Open pollination	
	number	mean height cm ± SE	number	mean height cm ± SE
Experiment 380 Tuusula, research stand 1, number of sample trees 21				
1968	1 419	10.6 ±0.35	1 689	11.2 ±0.27
1969	1 419	14.0 ±0.58	1 689	16.1 ±0.52
1970	1 391	24.8 ±1.18	1 685	30.6 ±0.83
Experiment 381 Punkaharju, research stand, number of sample trees 13				
1968	743	9.7 ±0.96	1 035	11.6 ±0.35
1969	743	15.7 ±0.73	1 035	20.6 ±1.05
1970	724	27.2 ±1.17	1 020	35.3 ±1.57
Experiment 382 Punkaharju, provenance spruce stand, number of sample trees 19				
1968	754	5.5 ±0.84	809	7.6 ±0.98
1969	754	8.8 ±0.93	809	12.6 ±0.80
1970	691	15.8 ±1.58	761	22.9 ±1.30

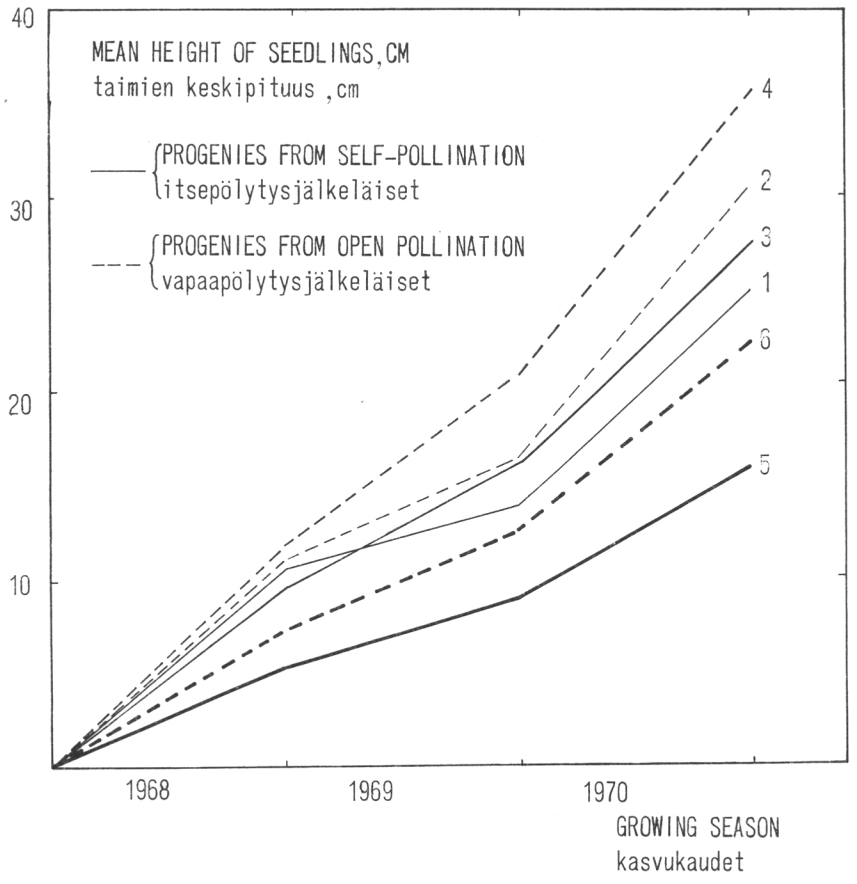


Figure 6. Picea abies. Growth of seedlings from self-pollination and open pollination in the nursery, 1 and 2, experiment 380, in 3 and 4 experiment 381 and 5 and 6 experiment 382. Exact values in Table 8.

Kuva 6. Picea abies. Itsepölytyksestä ja vapaapölytyksestä saatujen taimien pituuskasvu taimitarhassa. Viivat 1 ja 2 = koe 380, 3 ja 4 = koe 381, 5 ja 6 = 382. Tarkat arvot ovat taulukossa 8.

It is clear that a sizeable proportion of inbred seeds are destroyed at the beginning of their development in more severe conditions and in the prevalence of competition between plants. In experiments with self- and open pollination progenies of *Picea Abies* established by S y l v e n (1910), progenies from selfing fell an average of 48 per cent behind in growth in the terrain (E r i k s s o n 1972). Such an appreciable difference in the rate of growth means inevitably that the seedlings from self-fertilization are usually in a very subordinate position during their growth, even when they are older. There are no experimental results concerning the number of inbred seedlings that ultimately survive in the natural regeneration of forests or reforestation.

Comparison of the share of the genetic load that acts during the germination phase or after it with the share of embryonic lethals in the elimination of inbred progenies from the population reveals that the part that exerts its effect later is less significant. As embryonic lethals eliminate an average of almost 90 per cent of inbred embryos, the effect of defects of later occurrence is only a couple of per cent of the number of inbred seedlings produced, in other words, only a fraction of a per cent of the total of inbred embryos that have originated in the fertilization process.

5. DISCUSSION

Self-pollination, polyembryony and the genetic load of conifers together make up a machinery that must be studied as an entity. A considerable proportion of total pollination in natural stands is self-pollination. If the proportion of self-pollination were constant in all stages of development of every generation, the inevitable consequence would be a significantly high inbreeding coefficient. However, the genetic load, above all embryonic lethals, eliminates the individuals originating from self-fertilization almost completely. Polyembryony may be considered to spare the propagation potential from excessive losses due to self-fertilization. If one of the embryos of the ovule has originated through selfing and dies, a normal seed may develop from the ovule if it contains in addition to the inbred embryo one or several embryos originating through cross-fertilization.

No standard value can be given for the role of self-pollination and self-fertilization in natural forests made up of species of the *Pinaceae* family as they obviously vary over a very broad range. The share of self-fertilization is appreciably smaller than the share of own pollen in total pollination. According to the present results, the share of self-fertilization in the *Picea Abies* stands of South Finland is 5—10 per cent (see Table 1). This is of the same order as estimates for some other species (see Table 3).

Self-fertilization is not the only mode of crossing that leads to inbreeding. Self-fertilization is in fact not possible except in some groups of living organisms. Crossing of closely related individuals results in inbreeding, though in a milder form than self-fertilization. The extent to which hybridisation of closely related individual trees occurs in natural forests depends, of course, on how closely related the trees in the stand are that grow near one another. The author (K o s k i 1970) concluded earlier that 50 per cent of the pollination of a tree growing in a stand derives from within a radius of 50 m at the most. If the trees growing in this region are e.g. half-sibs, the conditions exist for quite a high inbreeding coefficient. However, it has not been possible so far to prove the existence of such related groups (T i g e r s t e d t, in print); nor, for the matter, has their absence been proved. There are quite obviously groups in forests, perhaps even entire

stands, that have originated from the seeding of a single tree, but there is no information on the commonness of such groups. It must also be noted that if 50 per cent of the pollen comes from within a radius of 50 m the other 50 per cent must come from further away. Some of the pollen from beyond 50 m comes in most cases from other stands.

The term genetic load has been used here in a biologic and qualitative sense. No mathematical analysis, evaluation of the fitness values or coefficients of selection were foreseen in this phase of the study. Indeed, it is questionable whether mathematical analysis will be useful even in the studies on conifers that are to be made later. If comparisons with a mathematical analysis are desired, for instance the load discussed in the present work must be regarded as belonging to the group »segregational load».

Studies of the genetic load of conifers have concentrated largely on the detrimental effects of mutation in the phases of origin and growth of seedlings. As regards the favouring of cross-breeding, this part of the load, however, is much less important than embryonic lethals. The percentage of filled seeds obtained after controlled self-pollinations has generally been regarded as the measure of self-fertility of the tree or tree species in question. When attention has been focused on the magnitude of the proportion of empty seeds the conclusion reached is that embryonic lethals essentially reduce the effect of inbreeding (e.g. Sarvas 1962, Stern 1968, Franklin 1971 and Johnsson 1972). The numbers of different embryonic lethals in sample trees have been estimated from the empty and filled seeds that follow self-pollination. Sarvas (1962), Fowler (1965), Bramlett and Popham (1971) and the author (Koski 1971) based their calculations on the empty seed percentages and the role of polyembryony in the origination of empty seeds. Sorensen (1969 and 1971) and according to him Franklin deliberately disregarded the effect of polyembryony.

Polyembryony is in fact of relatively little importance after controlled self-pollination or otherwise complete self-fertilization. The probability of an empty seed forming after self-fertilization of a tree which has as a heterozygote e.g. 10 different embryonic lethals is 95 per cent after one fertilization in the ovules and 93 per cent after two. It is practically impossible to show this difference in an experimental material. On the other hand, the second archegonium is of great significance when the other fertilization is cross-fertilization and the self-fertilization zygote has been eliminated with a probability of 95 per cent. To study the significance of polyembryony, individual trees in which the number of embryonic lethals is two or three must be selected as sample trees. Such a great difference is to be expected theoretically in these cases that it can be shown to be statistically reliable.

Piech and Stettler (1971) wrote about trees that are »good selfers» for haploid cultures. Embryonic lethals as such are not lethal in a single dose, nor do they prevent haploid culture. Nevertheless, embryonic lethals may become an obstacle to the differentiation of cellular tissues if they really are errors or defects in genes controlling differentiation. The same applies when a haploid culture is made diploid by means of, say, cholchicine treatment. It is in any case unrewarding to use random material as it is fairly certain that embryonic lethals will be included with the gametes. Greater success could be expected at least from this point of view if it were possible to select trees with the least possible number of embryonic lethals. The author agrees entirely with Piech and Stettler (op.cit.) on this point. In a tree with two embryonic lethals, 25 per cent of the gametes will have no lethal, in a tree with three embryonic lethals 12.5 per cent, and so on. The probability of »pure» gametes is generally $1/2^n$ when n = the number of embryonic lethals. Hence, an average tree ($n = 9$) of e.g. spruce and pine produces only approx. 2 per mille of pure gametes. This means that only two cultures out of 1 000 will be serviceable. The situation is not improved much if material is taken from many trees as the frequency of trees that contain few lethals is only about 2 per cent and no more than $1/4$ or $1/8$ of their gametes are »pure». If no extensive self-pollination series is collected, it is wisest to select a tree species which usually has fewer embryonic lethals. *Pinus peuce* seems so far to be the best and *Picea Omorica* the second best species.

Study of the genetic load of conifers is based essentially on controlled self-pollinations. A crossing procedure seems to cause in some way the formation of empty seeds and possibly also other disturbances. This means that the genetic load is over-estimated in the results. These suspicions arise from the fact that cross pollinations also as as rule give more empty seeds than open pollinations. Nearly 100 per cent of filled seeds could be expected in some cases from crossings between individual trees. It is fully understandable, however, that a lethal or defect becomes homozygotic as a result of crossbreeding non-relatives. This is because the number of different lethal and defect genes in a population is definite. It can be seen from this that even when self-pollination is ruled out completely almost as many empty seeds originate as after normal open pollination (Sarvas 1962, p. 137, Koski 1971). The probability of such coincidences is obviously small, for different non-superimposed chlorophyll defects were encountered in crossings of heterozygotes between the trees of the same stand (see p. 29). From this it follows that it is not possible to calculate the frequency of the albino gene in a population from the frequency of albino seedlings from mixed seed of some stand, as the albino seedlings did not originate through panmictic mating but from self-fertilizations.

It is possible within the genetic system of conifers for an individual tree to produce progeny through self-fertilization. The propagation potential is reduced, however, because of the great relative proportion of empty seeds. The elimination of embryonic lethals in the developmental phase of the embryo leads to at least a part of the progeny representing an equally high degree of heterozygosity as the mother tree. When the seed derives from an entire stand the proportion of individual trees produced by selfing is very small, even in the seed stage. If the share of self-fertilization is 10 per cent and the elimination capacity of embryonic lethals 90 per cent, only 1 per cent of the filled seeds will contain an embryo originating from self-fertilization. It is assumed then that also a part of the embryos originating from cross fertilization is destroyed. Unless the self-fertilization seedlings are exceptional cases like those mentioned on p. 30, they are obviously completely eliminated in natural conditions already in the seedling phase. In these circumstances the reducing effect of seedlings from self-fertilization on the mean growth of the stand remains negligible. Inbred seedlings apparently have better chances of survival in a nursery or hothouse (E r i k s s o n 1972). As the proportion of inbred seedlings in the total of seedlings is 1 or 2 per cent, they appear to constitute no economic problem. The genetic load of conifers, above all embryonic lethals, appears primarily to be a system which favours cross fertilization strongly. No numerical values can be given for the genetic load of conifers, it can merely be said to be qualitatively fairly great. The only explanation for the commonness of lethal genes in the gene pool of the population is that the heterozygotes have the optimal fitness value. The species of the *Pinaceae* family, which have been studied most up to the present, are in this respect no specialities compared with the other species studied. Tree species such as *Pinus peuce* and *Picea Omorica* whose genetic load may be exceptionally small appear to be more unusual.

SUMMARY

This investigation is a study of whether inbreeding due to self-pollination is a factor in natural forests that affects essentially the genetic structure of the populations and the growth rate of forests. It is assumed that premisses for the idea exist. According to the literature, the proportion of self-pollination is considerable in natural pollination and may be several tens of per cent. In addition, a number of published results point to the poorness and slow growth of seedlings obtained through controlled self-pollinations. It is obvious, however, that poor individual trees resulting from selfing are not encountered in natural forests in the same ratio as own pollen in pollination. Conifers have been observed to have a considerable genetic load which is manifested in selfing producing mostly empty seeds and the growth of weakened progeny even from full seeds. The genetic load eliminates individuals from selfing, in other words, reduces the proportion of inbreeding.

The present work deals with the author's material of pine (*Pinus sylvestris*) and spruce (*Picea Abies*). The proportion of self-pollination and self-fertilization is discussed first. The proportion of self-pollination is seen to vary within a broad range depending on the conditions. The proportion of self-pollination is estimated to average 10—20 per cent in most cases. However, the special pollination mechanism of spruce and pine ovules favours cross-pollination. It follows from this that the proportion of self-fertilization is smaller than that of self-pollination. The proportion of selfing was found with the help of genetic marker characteristics to be 5—10 per cent, which is only approximately a half of the proportion of self-pollination. Estimates of the same magnitude for other tree species have been published earlier.

The genetic load and its significance in self-fertilization are discussed. The term genetic load is used here in its biologic sence. It refers to the host of harmful genes contained in the gene pool of a population. Embryonic lethals cause the death of an individual in the course of embryonic development. Every tree of some conifer species studied had been found to contain many different emnryonic lethals as heterozygotes. In addition to the results for the *Pinus sylvestris* and *Picea Abies* species, small materials of the *Pinus peuce* and *Picea Omorica* species are presented here.

Tree species	Sample trees, number	Average number of embryonic lethals	Range of variation
Pinus sylvestris	127	8.9	2—20
Pinus peuce	7	3.1	2—9
Picea Abies	87	9.6	2—20
Picea Omorica	12	4.7	2—12

If embryonic lethals are present in all pine and spruce trees in the same ratio as in the sample trees studied, an average of nearly 90 per cent of the inbred embryos are destroyed before the seed is mature.

In the germination phase, the germination of inbred seeds was slower and the germination percentage smaller than that of seeds produced by cross-fertilization. Just as in many earlier studies, seedlings from self-fertilization were found to grow more slowly. In addition, several progenies displayed forms that were defective in different ways, e.g. albino seedlings. The deviants were generally lethal or subvital. The poor germinability of seeds from selfing and the slower development of the seedlings must mean in natural conditions that a considerable proportion of these seedlings is eliminated already in the early stage of their life.

The conclusion reached is that the genetic load of a tree species reduces the proportion of self-fertilization to a fraction of what it could be according to the proportion of self-pollination. For instance, if the proportion of self-pollination in a *Pinus sylvestris* or *Picea Abies* stand is 20 per cent, the proportion of trees from selfing in a stand of growing age is smaller than 1 per cent.

REFERENCES

Andersson, E. 1965. Cone and seed studies in Norway spruce (Picea Abies (L.) Karst.) Studia For. Suec. 23: 1—214 + XLI

Bramlett, D. L. and Popham, T. W. 1971. Model relating unsound seed and embryonic lethal alleles in self-pollinated pines. Silvae Gen. 20: 192—193

Doyle, J. and o' Leary, M. 1935. Pollination in Pinus. Scient. Proc. Royal Dubl. Soc. 20: 181—190

Eiche, V. 1955. Spontaneous chlorophyll mutations in Scots pine. Medd. Stat. Skogsforsk. 45/13: 1—64

Eriksson, G. 1972. Current research at the department of forest genetics, the Royal College of Forestry, Stockholm. Res. notes Department of forest genetics 11/72: 1—58

Fowler, D. 1965. Effects of inbreeding in Red Pine, Pinus resinosa. Ait. IV. Silvae Gen. 14: 76—81

Franklin, E. C. 1970. Survey of mutant forms and inbreeding depression in species of the Family Pinaceae. USDA Forest Service Res. Paper SE — 61: 1—21

Gregory, P. H. 1961. The microbiology of the atmosphere. Leonard Hill, London pp. 251

Hadders, G. 1972. Pollineringssituationen i tallplantager (Swedish with Engl. Smry). Föreningen skogsträdsförädling Institutet för skogsförbättring Årsbok 1971: 111—139

Hagman, M. and Mikkola, L. 1963. Observations on cross-, self- and interspecific pollinations in Pinus peuce Griseb. Silvae Gen. 12: 73—79

Heikinheimo, O. 1937. Über die Besamungsfähigkeit der Waldbäume II· Communic. Inst. For. Fenn. 24.4: 1—67

Johnsson, H. 1972. Självpollineringsfrekvenssen i en tallfröplantage, preliminary report, stenciled 8 pp.

Koski, V. 1968. The role of the size of pollen grains in the cross-breeding of anemophilous forest trees. (Finnish) Luonnon tutkija 72: 4: 127—131

—»— 1970. A study on pollen dispersal as a mechanism of gene flow in conifers. Commun. Inst. For. Fenn. 70.4: 1—78

—»— 1971. Embryonic lethals of Picea Abies and Pinus sylvestris. Communic. Inst. For. Fenn. 75.3: 1—30

McElwee, R. L. 1970. Radioactive tracer techniques for pine pollen flight studies and an analysis of short range pollen behaviour. Ph. D. Thesis N. C. State Univ. Raleigh Dep. Forestry

Mergen, F., Burley, J. and Furnival, G. M. 1965. Embryo and seedling development in Picea glauca (Moench) Voss. after self-, cross- and windpollination. Silvae Gen. 14: 188—194

Orr-Ewing, A. L. 1957. A cytological study of the effect of self-pollination on Pseudotsuga menziesii (Mirb) Franco. Silvae Gen. 6: 179—185

Piech, R. F. and Stettler, R. F., 1971. The detection of good selfers for haploid induction in Douglas-Fir. Silvae Gen. 20: 144—148

Sarvas, R. 1962. Investigations on the flowering and seed crop of Pinus sylvestris. Communic. Inst. For. Fenn. 53.4: 1—198

—»— 1968. Investigations on the flowering and seed crop of Picea Abies. Communic. Inst. For. Fenn. 67.5: 1—84

—»— 1972. Investigations on the annual cycle of development of forest trees, I Active period. Communic. Inst. For. Fenn. 76.3: 1—110

Schmidt, H., 1970. Versuche über die Pollenverteilung in einem Kieferbestand. Diss. Forstl. Fak. Univ. Göttingen

Sorensen, F., 1966. Linkage between marker genes and embryonic lethal factors may cause disturbed segregation ratios. Silvae Gen. 16: 132—134

—»— 1969. Embryonic genetic load in coastal Douglas-Fir, Pseudotsuga menziesii var. Menziesii. Amer. Nat. 103: 389—398

—»— 1971. Estimate of self-fertility in coastal Douglas-Fir from inbreeding studies. Silvae Gen. 20: 115—120

Stern, K. 1968. Die Bedeutung genetischer Polymorphismen für Forstgenetik und Forstpflanzenzüchtung. Allg. Forst. u. J-Ztg. 139: 199—204

—»— 1972. Über die Ergebnisse einiger Versuche zur räumlichen und zeitlichen Verteilung des Pollens einzelner Kiefern. Z. Pflanzenzüchtung, 67: 313—326

Sylvén, N., 1910. Om pollineringsförsök med tall och gran. Medd. Stat. Skogsforsk. 7: 219—228

Tigerstedt, P. M. A., 1973 (in print) Studies on isoenzyme variation in marginal and central populations of Picea Abies (Hereditas)

TIIVISTELMÄ

Tässä tutkimuksessa tarkastellaan sitä, onko itsepölytyksestä johtuva sisäsiitos populaatioiden geneettiseen rakenteeseen ja metsien kasvunopeuteen todella oleellisesti vaikuttava tekijä luonnon metsissä. Aluksi todetaan, että edellytykset tällaisen käsityksen syntymiselle ovat olemassa. Julkaistujen tutkimusten perusteella tiedetään, että luonnollisessa pölytyksessä itsepölytyksen osuus on huomattava, se voi olla useita kymmeniä prosentteja. On myös julkaistu useita tuloksia kontrolloiduista itse pölytyksistä saatujen taimien huonoudesta ja hitaasta kasvusta. On kuitenkin ilmeistä, ettei itsesiitoksesta syntyneitä huonoja yksilöitä ole luonnon metsissä samassa suhteessa, kuin omaa siitepölyä on pölytyksessä. Havupuilla on todettu olevan huomattavan suuri geneettinen kuorma (genetic load), joka ilmenee siten, että itsesiitoksesta syntyy enimmäkseen tyhjiä siemiä ja täysistäkin siemenistä kasvaa heikentyneitä jälkeläisiä. Geneettinen kuorma karsii itsesiitoksesta syntyneitä yksilöitä eli pienentää sisäsiitoksen osuutta.

Tässä työssä käsitellään kirjoittajan aineistoon perustuen mäntyä (*Pinus sylvestris*) ja kuusta (*Picea Abies*). Aluksi käsitellään itsepölytyksen ja itsehedelmöityksen osuutta. Isepölytyksen osuuden todetaan vaihtelevan laajoissa rajoissa olosuhteista riippuen. Useimmissa tapauksissa itsepölytyksen osuus arvioidaan keskimäärin 10—20 %:ksi. Kuusen ja männyn siemenaiheiden erikoinen pölyttymismekanismi suosii kuitenkin ristipölytystä. Tästä seuraa, että itsehedelmöityksen osuus on pienempi kuin itsepölytyksen. Geneettisten merkkiominaisuuksien avulla on todettu itsehedelmöityksen osuudeksi 5—10 % eli vain n. puolet itsepölytyksen osuudesta. Eri tutkijat ovat aikaisemmin julkaisseet saman suuruisia arvioita muista puulajeista.

Tämän jälkeen käsitellään geneettistä kuormaa ja sen merkitystä itsesiitoksen yhteydessä. Termiä geneettinen kuorma (genetic load) käytetään tässä työssä sen biologisessa merkityksessä. Sillä tarkoitetaan populaation gene pooliin sisältyvää vahingollisten geenien joukkoa. Alkioletaalit aiheuttavat yksilön kuoleman alkiokehityksen kuluessa. Muutamalla tutkitulla havupuulajilla on todettu kaikkien yksilöiden sisältävän useita erilaisia alkioletaaleja heterotsygoottina. Kirjoittaja esittää tuloksia paitsi mainituista Pinus sylvestris- ja Picea Abies-lajeista myös pienistä aineistoista Pinus peuce- ja Picea Omorica-lajeilla.

Puulajit	Koepuita kpl	Alkioletaaleja keskim. kpl	Vaihtelu-väli
Pinus sylvestris	127	8.9	2—20
Pinus peuce	7	3.1	2—9
Picea Abies	87	9.6	2—20
Picea Omorica	12	4.7	2—12

Mikäli alkioletaalit esiintyvät männyllä ja kuusella kaikissa puissa samoissa suhteissa, kuin tutkituissa koepuissa, itsesiitosalkioista tuhoutuu keskimäärin lähes 90 % ennen siemenen valmistumista.

Itämisvaiheessa todettiin, että itsesiitoksesta syntyneiden siementen itäminen on hitaampaa ja itämisprosentti on pienempi kuin ristisiitoksesta syntyneiden siementen. Itsesiitoksesta syntyneet taimet todettiin, kuten monissa aikaisemmissa tutkimuksissa, hitaammin kasvaviksi. Lisäksi useissa jälkeläistöissä oli eri tavoin puutteellisia muotoja kuten albiinotaimia. Poikkeavat tyypit ovat yleensä joko letaaleja tai subvitaaleja. Itsesiitoksesta syntyneiden siementen heikko itäminen ja taimien hitaampi kehitys merkitsevät luonnon olosuhteissa varmasti sitä, että huomattavan suuri osa näistä taimista karsiutuu jo elämänsä alkuvaiheessa.

Tulosten perusteella päädytään siihen johtopäätökseen, että nimenomaan puulajilla oleva geneettinen kuorma pienentää itsesiitoksen osuuden murto-osaan siitä, mikä se voisi olla itsepölytyksen osuuden perusteella. Jos esim. Pinus sylvestris tai Picea Abies metsikössä itsepölytyksen osuudeksi arvioidaan 20 %, on itsesiitoksesta syntyneiden puiden osuus kasvuikäisessä metsikössä varmasti pienempi kuin 1 %.