



# FOLIA FORESTALIA

METSÄNTUTKIMUSLAITOS  
THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE  
HELSINKI 1993

804

Martti Saarilahti

MIRKROAALTOSONDIN SOVELTUVUUS HAKEKUORMAN  
KÄYTTÖARVON MITTAUKSEEN

Measuring of the chip load properties using microwave sounding

# FOLIA FORESTALIA

---

## **Julkaisija — *Publisher***

Metsäntutkimuslaitos  
*The Finnish Forest Research Institute*

## **Toimitus — *Editors***

Päätoimittaja — <i>Editor in chief:</i>	Erkki Annila
Toimittaja — <i>Editor:</i>	Seppo Oja
Toimittaja — <i>Editor:</i>	Tommi Salonen

Unioninkatu 40 A, FIN-00170 Helsinki, Finland  
tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308

## **Toimituskunta — *Editorial Board***

Erkki Annila (pj. — *chairman*), Pentti Hakkila, Seppo Kaunisto, Jari Kuuluvainen, Juha Lappi, Eino Mälkönen

## **Tavoitteet ja tarkoitus — *Aim and Scope***

Sarjassa julkaistaan tutkimuksia, tilastoja ja kirjallisuuskatsauksia, joilla on ensisijaisesti kotimaista merkitystä. Julkaisukielenä on kotimainen kieli, mutta julkaisut sisältävät englanninkielisen selosteen tärkeimmistä tutkimustuloksista.

*Folia Forestalia publishes research reports, statistics and literature reviews relevant to Finnish forestry.*

## **Tilaukset — *Subscriptions***

Tilaukset ja tiedustelut pyydetään osoittamaan Metsäntutkimuslaitoksen kirjastolle. *Subscriptions and orders for back issues should be addressed to the Library of the Institute.*



FOLIA FORESTALIA 804

Metsäntutkimuslaitos. Institutum Forestale Fenniae. Helsinki 1993

---

Martti Saarilahti

MIKROAALTOSONDIN SOVELTUVUUS HAKEKUORMAN  
KÄYTTÖARVON MITTAUKSEEN

Measuring of the chip load properties using microwave sounding

*Approved on 5.2.1993*

SISÄLLYS

1 JOHDANTO .....	3
2 MIKROAALTOMENETELMÄN MITTAUSPERIAATE .....	3
3 AINEISTON KERÄYS JA KÄSITTELY .....	5
4 TULOKSET RESONAATTORIMITTAUKSISTA .....	5
5 TUNKEUMAVASTUS HAKKEESSA .....	8
6 TULOSTEN SOVELTAMINEN KÄYTÄNTÖÖN .....	9
KIRJALLISUUS — REFERENCES .....	10
SUMMARY .....	11

Saarilahti M. 1993. Mikroaaltosondin soveltuvuus hakekuorman käyttöarvon mittaukseen. Summary: Measuring of the chip load properties using microwave sounding. *Folia Forestalia* 804. 11 p.

Tutkimuksessa selvitetään mikroaaltosondin käyttömahdollisuuksia hakekuorman kosteuden ja kuivatiheyden mittaamiseen. Tutkimuksessa mitattiin kiinteässä resonaattorissa viiden kosteudeltaan ja kuivatiheydeltään vaihtelevan hakelajin dielektrisyysvakion reaaliosaa ja hyvyysslukua sekä selvitettiin näiden käyttöä hakkeen mitatun veden määrän ja kuivatiheyden määrittämiseksi. Voitiin todeta, että veden tilavuusosuus voidaan mitata muuta tunnuksia tarkemmin ( $R^2 = 94,7\%$ ). Mikäli paino- ja kehysmittauksella on todettu hakkeen tuoremassa ja -tiheys, kuivatiheys voidaan laskea vähennyslaskun avulla. Mikäli kuorma on mitattu kehysmittaa käyttäen, kuivatiheys voidaan laskea verraten tarkasti dielektristen arvojen perusteella. Tosin tulos on jonkin verran harhainen. Menetelmällä päästään alle 6 % virheeseen kuivamassan määrittämisessä. Sondimenetelmä vaatii kiinteän asennuksen, sillä sondin työntämiseen hakekuormaan arvioitiin tarvittavan 10 kN voima.

The dielectric properties of 5 different chip types were measured using a closed resonator and the density and moisture of the samples determined. The accuracy of determining the volume percent of water was higher ( $R^2 = 94,7\%$ ) than measurement of other alternative characteristics. The dry mass of chips can be determined either by subtracting the mass of water, if the weight and volume scaling are used or the dry density can be determined based on dielectric properties, if volume scaling is used. In both cases the average error was less than 6 %, but in practice the weight scaling will be more accurate, however, because the dry density based on dielectric model contained some systematic error due to multicollinearity between moisture and dry density. Based on observations on the penetration force needed to push the steel rod through small chip sample it is assumed, that the force about 10 kN is needed for pushing the probe through the lorry load.

Keywords: microwave, moisture, density, wood chips  
FDC 861.0 + 539--015.7

Author's address: The Finnish Forest Research Institute, Department of Forest Production, Unioninkatu 40 A, FIN-00170 Helsinki, Finland.

ISBN 951-40-1298-4  
ISSN 0015-5543

Tampere 1993. Tammer-Paino Oy



# 1 Johdanto

Tärkeimpänä hakkeen käyttöarvoon vaikuttavana tekijänä voidaan pitää kuivamassaa, joskin energiakäytössä myös kosteuden vaikutus on merkittävä (Hakkila 1984, 1985). Nykyiset mittausten menetelmät, kehysmittaus ja/tai painomittaus, eivät anna tietoa kosteudesta tai kuivamassasta, joten lisämenetelmänä käyttöarvon määrittämiseksi käytetään näytteenottoon perustuvia gravimetrisiä kosteudenmääritysmenetelmiä tai empiirisiä keskiarvoja (Verkasalo 1987).

Radioaaltojen käyttö eri aineiden kosteuden mittaamiseen on periaatteessa tunnettu jo kauan, ja 50-luvulla menetelmiä kehitettiin useissa maissa, mm. Suomessa (Sorsa & Nykänen 1952). Erittäin voimakasta radioaaltojen käyttöön perustuvien kosteuden mittausten kehitys oli 1960-luvun puolesta välistä 1970-luvun puoleen väliin (Ståhl 1984). Kuitenkin radioaaltojen sovellusten käyttö metsäteollisuudessa on vielä melko vähäistä, mikä ilmeisesti johtuu siitä, että radioaaltojen käyttömahdollisuuksia ei tunneta kovin hyvin (Fisher 1985, Verkasalo 1987). Viimeaikaisesta tutkimustoiminnasta Suomessa mainittakoon Hyytiän (1984) teollisuushakkeen kosteuden mittaamista koskeva tutkimus sekä Ståhlin (1984) levyhakkeen ja Fisherin (1985) vaneriviulun kosteuden mittaamista koskevat tutkimukset. Mitta-

uslaitteena Hyytiä käytti kiinteää resonanttoria, johon hake asetettiin annoksina. Ståhl ja Fisher konstruivat kiinteän anturin, joka mittasi ohikulkevaa materiaalivirtaa. Ståhl mittasi hakevirran kosteuden lisäksi myös hakkeen massaa. Mikroaaltoihin perustuvia mittausten menetelmiä on tutkittu Valtion teknillisessä tutkimuskeskuksessa (Lankinen 1989) ja teollisia sovelluksia mm. Imatran Voima Oy:ssä (Siimes ym. 1986). Teknisen korkeakoulun radiolaboratoriossa on kehitetty sondiperiaatteella toimivia radioaaltojen käyttöön perustuvia laitteita turvekerrosten kosteuden ja polttoarvon mittaamiseksi (Tiuri & Toikka 1982, Tolonen ym. 1982) ja lumen ominaisuuksien mittaamiseksi (Tiuri ym. 1982). Näissä antenni työnnetään mitattavaan väliaineeseen, ja tutkittava aine on liikkumaton. Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkia mahdollisuuksia käyttää radiosondiperiaatetta hakekuorman käyttöarvon mittaamiseksi.

Metsät. yo. Riitta Laurila suoritti tarvittavat mittaukset. DI Martti Toikka avusti resonattorimittauksissa ja MH Kirsi Maasalo hankki hakenäytteitä. Ms Maija Tuuri on viimeistellyt käsikirjoituksen. Käsikirjoituksen on tarkastanut prof. Matti Kärkkäinen ja prof. Arto Usenius. Parhaat kiitokset kaikille.

## 2 Mikroaaltojen mittausten periaate

Väliaineen sähköiset ominaisuudet määräävät siinä etenevän radioaallon etenemisnopeuden ja vaimenemisen. Etenemisnopeutta voidaan kuvata dielektrisyysvakion reaaliosan ( $\epsilon_r'$ ) avulla. Se voidaan määrittää mittaamalla aallon taajuus väliaineessa ja vertaamalla sitä aallon taajuuteen ilmassa. Reaaliosaa kutsutaan myös aineen permittiivisyudeksi.

$$\epsilon_r' = \left( \frac{f_o}{f_e} \right)^2 \quad (1)$$

jossa

$\epsilon_r'$  = suhteellisen dielektrisyysvakion reaaliosa

$f_o$  = taajuus ilmassa, Hz

$f_e$  = taajuus väliaineessa, Hz

Vaimenemista eli tehohäviötä voidaan kuvata suhteellisen dielektrisyysvakion imaginääriosan " $\epsilon_r''$ " avulla. Tehohäviö johtuu polarisaatiosta, väliaineen sähköisesti varautuneiden osasten liikkeestä suunnaltaan vaihtelevassa sähkökentässä. Polarisaatiomekanismi on erilainen eri hiukkas-koilla, ja mukaan tulevat tasot ovat taajuuden lisääntyessä seuraavat:

- ionipolarisaatio
- molekyyli-polarisaatio
- värähtely-polarisaatio
- elektronipolarisaatio

Polarisaatiossa aineen polarisoituvat hiukkaset, mikroaaltoalueella ionit ja molekyylit, pyrkivät kääntymään sähkökentän mukaan. Matalilla taa-

juuksilla järjestäytyminen ehtii tapahtua täysin, korkeilla taajuuksilla eivät hiukkaset ehdi järjestyä lainkaan. Määrätyllä taajuudella, relaksaatio-taajuudella, järjestäytyminen on täydellistä, ja tällöin myös häviöt ovat suurimmillaan. Dielektrisyysvakioiden imaginääriosat ovat siis riippuvainen käytetystä taajuudesta. Veden molekyylit ovat hyvin polaarisia, ja näin vesimolekyylit puussa lisäävät seoksen polaarisuutta ja vaikuttavat merkittävästi kostean puun dielektrisiin ominaisuuksiin.

Mikroaaltomenetelmien käyttö puun kosteuden mittaamiseen perustuu kuivan puun dielektrisyysvakioiden reaaliosan,  $\epsilon_r' = 1,5 \dots 2,0$  (James 1977, Fisher 1985) ja vapaan veden dielektrisyysvakioiden,  $\epsilon_r' = 80$  (Hallikainen 1977), suureen eroon. Veden määrä puu-vesi -seoksessa vaikuttaa huomattavasti enemmän puu-vesi -seoksen dielektrisiin ominaisuuksiin kuin vaihtelu puun tiheydessä. Mittaamalla kostean puun dielektrisen vakion reaaliosa, yksiparametrimittaus, voidaan laskea puun kosteus. Käytännössä puu-vesi -seoksen sähköinen käyttäytyminen on huomattavasti monimutkaisempi, ja puu-vesi -seokselle on kehitetty teoreettisia malleja, joista parhaina pidetyt perustuvat selluloosakristallien rakenteen mikroaaltomalleihin (Tinga 1969a).

Jo yksinkertaisia malleja laadittaessa on kuitenkin huomattava, että sidotun veden dielektrisyysvakioiden reaaliosa  $\epsilon_r'$  on kosteudesta riippuvainen, sillä alhaisissa kosteuksissa vesimolekyylit ovat lujemmin selluloosaan sitoutuneita kuin kosteammassa puussa, jossa vesikerros on useampia molekyylejä paksu (Skaar 1972). Kuvassa 1 esitetään Tingan (1969a) ja Stählin (1984) esittämä veden  $\epsilon_r'$  -arvo puun kosteuden funktiona. On ilmeistä, että toinen muutosalue hakkeen dielektristen ominaisuuksien ja kosteuden välillä saavutetaan, kun hake alkaa olla vedellä kyllästettyä ja hakepalojen pinnalla on vapaata vettä.

Koska jään suhteellinen dielektrisyysvakio ( $\epsilon_r' = 3,17$ , Cooper ym. 1976) on lähellä puun arvoa ja poikkeaa täysin veden arvosta, ei menetelmä sovellu jäätyneen hakkeen kosteuden mittaamiseen. Tämä tulee rajoittamaan menetelmän käyttöä Suomen olosuhteissa.

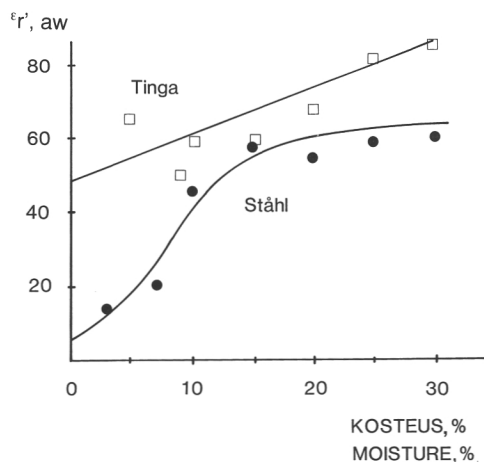
Puussa aallon tehohäviöiden mallit, joihin dielektrisyysvakioiden imaginääriosan,  $\epsilon_r''$ , mittaus ja soveltaminen perustuvat, ovat reaaliosaa monimutkaisempia johtuen siitä, että häviöt voivat johtua useasta tekijästä, kuten jo polarisaation monivaiheisuus osoitti. Puun lämpötilan ja kemiallisen koostumuksen vaihtelu voi aiheuttaa myös vaihtelua vaimennukseen. Tästä syystä kaksiparametrimittaus, jossa mitataan sekä aallon

nopeutta että vaimenemista, voidaan soveltaa puun kosteuden ja muiden ominaisuuksien, esimerkiksi tiheyden, mittauksiin. Resonaattorimitauksissa vaimenemista kuvataan hyvyysluvulla, Q-arvolla, joka on resonanssitaajuus jaettuna puolen tehon kaistanleveydellä. Tästä voidaan edelleen laskea dielektrisyysvakioiden imaginääriosan arvo.

Puun dielektrisyysvakio riippuu monista tekijöistä, kuten

- taajuudesta
- rakenteesta
- tiheydestä
- lämpötilasta
- koostumuksesta
- siihen sitoutuneesta vedestä (Fisher 1985)

Dielektriset ominaisuudet riippuvat myös mittaussuunnasta trakeidien suhteen (Tinga 1969b). Puun muiden ominaisuuksien ja dielektristen ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia voidaan selvittää sekä teoreettisesti että empiirisesti kehitettävissä menetelmiä mikroaaltomenetelmien käyttämiseksi puun ominaisuuksien tutkimiseen. Tässä tutkimuksessa empiirisin tutkimuksin selvitetään radiosondiperiaatteen käyttöä hakekuorman käyttöarvon mittaamiseksi. Tutkimuksen ensimmäisessä osassa tutkitaan dielektristen ominaisuuksien ja hakkeen ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia. Toisessa osassa tutkitaan sondikärjen tunkeutumista hakkeeseen. Näitä tietoja tarvitaan kehitettäessä varsinaista sondia empiirisiiä tutkimuksia varten.



Kuva 1. Veden dielektrisyysvakio puun kosteuden funktiona (Ståhl 1984).

Figure 1. Dielectric constant of water as a function of wood moisture (Ståhl 1984).

### 3 Aineiston keräys ja käsittely

Tutkimusta varten hankittiin säkillinen viittä eri hakelajia kolmelta toimittajalta. Enso-Gutzeit Oy:n Heinolan tehtaasta toimitti mäntysahahaketta, kuorellista koivuhaketta ja kuorellista leppähaketta. Myllykoski Oy toimitti mäntysahahaketta sekä hiomapurilaista tehtyä kuusihaketta. Työtehoseuralta hankittiin kaatotuoreesta pieniläpimittaisesta koivusta valmistettua haketta. Hakkeista kuorellinen koivu- ja leppähake oli palakooltaan suurempaa ja tarkoitettu levyteollisuudelle. Mänty- ja kuusihake oli teollisuushaketta. Tuore koivupienpuuhake hakettiin polttohakkeen tapaan. Mäntyhake on pääosin kuoritua pintapuuta, kuusihake yksinomaan sydänpuuta, koivu- ja leppähakkeet kuorellista runkopuuta.

Hakkeiden kosteutta varioitiin keinotekoisesti, ja erilaisia käsittelytapoja oli kuusi, ja seitsemän suurin ryhmä, käsittelemätön. Osaa hakkeesta kasteltiin runsaasti, osaa lievästi, osaa kuivattiin uunissa 50°C lämmössä 4 h ja osaa 8 h. Osa hakkeesta varastoitettiin ulkona, ja osa kuivatettiin uunissa absoluuttisen kuivaksi, vaikkakin ennen mittauksia se oli jo ehtinyt imeä jonkin verran kosteutta. Ainoastaan mäntyhakkeelle tehtiin kaikki kuusi käsittelyä, muille lajeille vain lievä kostutus ja kuivattaminen.

Hakkeen palakoon vaikutusta tutkittiin seulomalla osa hakkeesta kahteen fraktoon, yli 8 mm:n ja alle 8 mm:n fraktoon, sekä kolmantena luokkana seulomaton erä. Hakkeen tiivyyden vaikutusta tutkittiin vaihtelemalla resonaattorin sullonta-astetta. Sullonta-asteita oli neljä: löyhä, normaali, tiivis ja erittäin tiivis.

Dielektrisyysvakio mitattiin Teknillisen korkeakoulun radiolaboratorion rakentamalla koak-

siaaliresonaattorilla. Resonaattorin sisään sijoitetun 1,8 litran suuruisen hakenäytteen läpi johdettiin mikroaaltokenttä, ja laite etsi resonanssitaajuuden, joka vastaa hakkeeseen syntyvän aallon taajuutta. Resonaattori mittaa myös taajuuden, jossa teho on alentunut 3 dB, josta lasketaan tehohäviötä kuvaava hyvyysluku Q. Mitattaessa kirjattiin resonanssitaajuus, 3 dB:n taajuudet sekä hyvyysluku.

Hakenäytteiden kosteus mitattiin lämpökaapipimenetelmällä. Resonaattorin näyteastiasta otettiin kaksi rinnakkaisnäytettä (A ja B) paperipusseihin. Näytteet punnittiin tuoreina ja kuivattiin lämpökaapissa ja laskettiin kosteus, kosteussuhde sekä veden massa näytteessä. A ja B näytteiden kosteuden välinen korrelaatiokerroin oli  $r = 0,992^{***}$ . Mallit laskettiin näytteiden keskiarvosta. Tulosten käsittelyä varten laskettiin hakkeen tuore- ja kuivatiheys mitattujen massojen ja resonaattoriastian (0,00177 m<sup>3</sup>) tilavuuden avulla. Kuiva- ja tuoretiheydet ilmoitetaan kg/m<sup>3</sup>. Vastaavasti laskettiin veden massa kuutiometriä kohti. Veden tilavuusosuus laskettiin veden massasta veden tilavuuden ja resonaattorin astian tilavuuden suhteena käyttämällä veden tiheytenä 1000 kg/m<sup>3</sup>.

Resonaattorissa mitatusta resonanssitaajuudesta laskettiin vastaava dielektrisyysvakion reaaliosa kokeellisen kalibrointiyhtälön avulla. Yhtälö on saatu täyttämällä resonaattoria väliaineilla, joiden 'r' tunnetaan, ja mittaamalla resonanssitaajuus. Hyvyysluku Q ilmaisee aallon puolen tehon kaistalevyyden suhteen resonanssitaajuuteen. Tästä voitaisiin johtaa dielektrisyysvakion imaginääriosaa 'r', mutta yksinkertaisuuden vuoksi analyysissä käytetään hyvyyslukua Q.

### 4 Tulokset resonaattorimittauksista

Kuten jo kirjallisuuskatsauksen ja teoreettisen tarkastelun perusteella voitiin odottaa, oli veden tilavuusprosentin ja mitatun resonanssitaajuuden välillä huomattavasti parempi riippuvuus kuin kosteuden ja taajuuden perusteella. Parhaaksi malliksi osoittautui logistinen malli:

$$VVOL\% = \frac{EXP(13,84 - 0,102 \times f)}{(1 + EXP(13,84 - 0,102 \times f))} \times 34,27 - 3,77$$

$R^2 = 94,7$   $N = 365$  (2)

$$M = \frac{EXP(19,36 - 0,134 \times f)}{(1 + EXP(19,36 - 0,134 \times f))} \times 71,63 - 9,02$$

$R^2 = 85,6$   $N = 365$  (3)

jossa

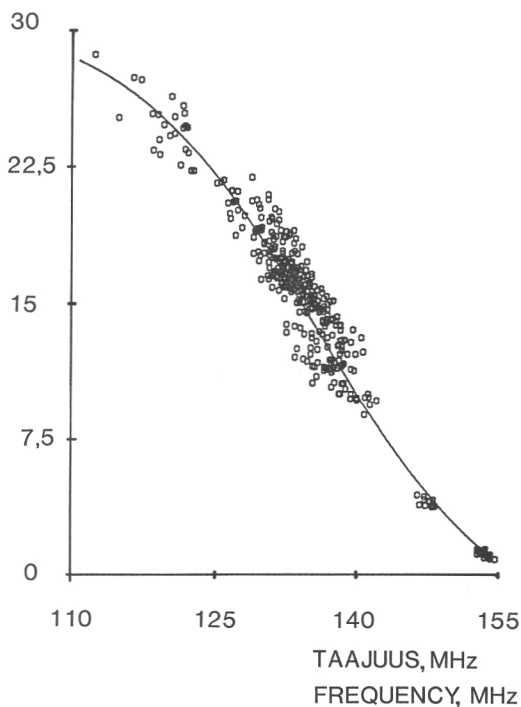
VVOL% = kosteus ilmaistuna veden tilavuusosuutena, %

M = kosteus, %

f = resonanssitaajuus, MHz



VESI, TIL-%  
WATER, VOL-%



Kuva 2. Veden tilavuusosuus taajuuden funktiona.  
Figure 2. Volume percent of water as a function of resonance frequency.

Kuvassa 2 näkyvä kuvaajan kaartuminen alhaisissa kosteuksissa johtuu sidotun veden sidosenergian lisääntymisestä. Veden dielektrisyysvakiohan pienenee, kun vesi on tiukasti sitoutunut selluloosakristalleihin. Koska käytännössä hakekuormien mittauksessa ei näin alhaisia kosteuksia tavata, jätettiin nämä keinotekoisesti kuivatut näytteet pois myöhemmistä analyyseistä. Keskiosaltaan kuvaaja on lähes lineaarinen, eli taajuus kasvaa lineaarisesti kosteuden noustessa. Kuvaajan käyristyminen kosteimmissä näytteissä johtunee vapaan veden esiintymisestä hakkeen pinnalla. Osassa paljon kostutetuista näytteistä on mittausvirhe mahdollinen, sillä määrittäessä taajuus näytti olevan resonanssitorin mittaustalteen rajalla, ja saman näytteen eri lukemakertojen tuloksissa oli suurta hajontaa, kun taas normaalikosteista näytteistä saatiin eri mittauskerroilla yleensä sama lukema. Käytännössä tällaiset mittaustilanteet ovat harvinaisia, lähes mahdottomiakin, ja edellyttävät kuorman tahallista kastelua runsaalla vesimäärällä. Analyyseissä myös runsaasti kastellut näytteet jätettiin tarkas-

Taulukko 1. Muuttujien väliset korrelaatiot.  
Table 1. Correlation matrix between the variables.

	$\epsilon_r'$	Q	Dd	VVOL	MC	Sull
$\epsilon_r'$	1					
Q	0,289	1				
Dd	0,716	0,299	1			
VVOL	0,913	0,128	0,578	1		
MC	0,451	0,118	0,188	0,686	1	
Sull	0,676	0,363	0,801	0,561	0,027	1

$\epsilon_r'$  = Dielektrisyysvakio — Dielectric constant  
Q = Hyvyysluku — Loss factor  
Dd = Kuivatiheys — Dry density  
VVOL = Veden tilavuusosuus — Volume percent of water  
MC = Kosteussuhde — Moisture content  
Sull = Sullonta-aste — Packing grade

telun ulkopuolelle. Aineiston luotettavuustesteissä todettiin 4 havaintoa, jotka Q-arvoiltaan poikkesivat muusta aineistosta, ja nämä jätettiin pois aineistosta. Kyseessä on resonanssitorin toimintatavasta johtuva tekninen "virhe". Lopullinen analyysi suoritettiin 281 näytteestä jotka kuuluivat kosteuskäsittelyryhmiin vähän kuivatut–vähän kastellut.

Aineistossa voitiin havaita kuivatiheyden ja veden määrän selvä korreloituminen ( $r = 0,578$ ), vaikka kosteussuhde olikin kuivatiheydestä riippumaton (taulukko 1). Tämä multikollineaarisuus vaikuttaa analyysituloksiin, koska sekä puun että veden määrä vaikuttavat seoksen dielektrisiin ominaisuuksiin. Dielektrisyysvakion reaaliosan,  $\epsilon_r'$ , vaihtelusta voitiin selittää 90,6 % kuivatiheyden ja veden määrän avulla (malli (4)):

$$\epsilon_r' = 2,03 + 0,00245 \times W_{\text{mass}} + 0,1225 \times Dd \times W_{\text{mass}}^2 \times 10^{-10} \quad R^2 = 90,7\% \quad (4)$$

Hakelajittaiset mallit olivat seuraavat:

$$\text{Mä} \quad \epsilon_r' = 1,77 + 0,00407 \times W_{\text{mass}} + 0,1093 \times Dd \times W_{\text{mass}}^2 \times 10^{-10} \quad R^2 = 93,7\% \quad (5a)$$

$$\text{Ko} \quad \epsilon_r' = 1,85 + 0,00293 \times W_{\text{mass}} + 0,1487 \times Dd \times W_{\text{mass}}^2 \times 10^{-10} \quad R^2 = 96,1\% \quad (5b)$$

$$\text{Ku} \quad \epsilon_r' = 1,95 + 0,2750 \times Dd \times W_{\text{mass}}^2 \times 10^{-10} \quad R^2 = 55,5\% \quad (5c)$$

$$\text{Ko} \quad \epsilon_r' = 2,01 + 0,2995 \times Dd \times W_{\text{mass}}^2 \times 10^{-10} \quad R^2 = 39,7\% \quad (5d)$$

$$\text{Le} \quad \epsilon_r' = 2,30 + 0,1667 \times Dd \times W_{\text{mass}}^2 \times 10^{-10} \quad R^2 = 39,1\% \quad (5e)$$

jossa

$\epsilon_r'$  = dielektrisyysvakion reaaliosa

Dd = kuivatiheys, kg/m<sup>3</sup>

W<sub>mass</sub> = veden massa, kg/m<sup>3</sup>

Mallien (5a)–(5e) yhteinen selitysaste oli 93,0 %. Ryhmillä 3–5 malliin tuli ainoastaan kuivatiheyden ja veden määrän neliö johtuen lähinnä

kapeammasta kuivatiheyden ja kosteuden vaihtelualueesta.

Kuten jo taulukosta 1 voidaan päätellä on Q-arvo lähes riippumaton hakkeen ominaisuuksista. Niinpä Q-arvoa selittävät mallit jäivät selityksasteeltaan alhaisiksi, alle 20 %:n.

Kehitettäessä radioaalto menetelmiä hakkeen käyttöarvon määrittämiseksi hakkeen ominaisuuksien syöttötietoina voidaan käyttää hakelajia/hakkurityyppejä ym. ryhmittelymuuttujia, hakekuorman tilavuutta (kehysmitta) ja/tai hakekuorman massaa (painomitta). Nämä mittaukset voidaan tarvittaessa automatisoida. Kolmantena syöttötietoina voidaan käyttää radioaaltoanturin antamaa signaalia, joka sisältää informaation relaxaatiotaajuudesta ja vaimenemisesta. Tulos voidaan saada suoraan laskemalla empiiriset riippuvuudet taajuuden ja hyvyysluvun välille tai kehittämällä tarkempia malleja hakkeen ominaisuuksien ja dielektristen vakioiden ( $\epsilon_r'$  ja  $\epsilon_r''$ ) käyttämiseksi. Koska radioaalto menetelmien teoreettinen tutkimus kuuluu luontevammin radiotekniikkaan, tässä tutkimuksessa käytetään black-box -tekniikkaa, ja tutkitaan mitatun hyvyysluvun ja taajuudesta lasketun dielektrisyysvakion reaaliosan ja hakkeen ominaisuuksien välisiä riippuvuuksia.

Kuten jo kuvasta 2 nähdään, voidaan hakkeessa olevan veden tilavuusosuus ja täten veden massa arvioida melko luotettavasti dielektrisyysvakion reaaliosan perusteella. Parhaaksi malliksi osoittautui tangenttimuunnos, ja puulajeittaisiksi malleiksi saatiin seuraavat:

1 Mänty	$VVOL\% = ATN(-0,1695 + 0,4466 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 90,1\%$ (6a)
2 Koivu	$VVOL\% = ATN(-0,1701 + 0,4299 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 93,2\%$ (6b)
3 Kuusi	$VVOL\% = ATN(+0,0022 + 0,2665 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 59,7\%$ (6c)
4 Koivu	$VVOL\% = ATN(+0,0420 + 0,1732 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 37,7\%$ (6d)
5 Leppä	$VVOL\% = ATN(+0,0704 + 0,2001 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 36,5\%$ (6e)

Voitiin todeta, että mänty-, koivu- ja kuusihakkeet eivät poikenneet toisistaan, ja näennäinen ero kertoimissa selittyi kuusen kapeasta kosteusalueesta. Sen sijaan koivu- ja leppälevyhakkeet erottuivat omaksi ryhmäkseen, joten seuraavia yhdistettyjä malleja voidaan käyttää yhtä hyvin:

MäKoKu	$VVOL\% = ATN(-0,1793 + 0,4466 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 91,1\%$ (7a)
KoLe	$VVOL\% = ATN(-0,2326 + 0,4642 \times \ln \epsilon_r')$ $R^2 = 75,0\%$ (7b)

Yhteinen malli (8) kaikille aiheuttaa jo systemaattista virhettä, joten menetelmää kehitettäessä hakkeen lajitelmat on tutkittava erikseen.

$$\text{Kaikki} \quad VVOL\% = ATN(-0,2166 + 0,4728 \times \ln \epsilon_r') \quad R^2 = 85,5\% \quad (8)$$

missä  
 $VVOL\%$  = veden osuus tilavuudesta, %  
 $\epsilon_r'$  = dielektrisyysvakion reaaliosa

Yhteinen selityksaste malleille (6a–6e) oli  $R^2 = 93,5\%$   
 malleille (7a–7b)  $R^2 = 90,5\%$   
 mallille (8)  $R^2 = 85,0\%$

Mikäli kuorman mittauksessa käytetään sekä kehys- että painomittausta, voidaan kuivamassa laskea vähentämällä veden massa tuoremassasta. Veden massa voidaan laskea veden tilavuusprosentista. Lasketun ja mitatun kuivatiheyden välisten mallien selityksasteet olivat:

- yhdistämällä koko aineisto, (malli (8)),  $R^2 = 70,2\%$
- jakamalla aineisto muu- ja levyhakkeeseen, (mallit (7)),  $R^2 = 78,4\%$
- laskemalla kuivamassa joka lajille erikseen, (mallit (6)),  $R^2 = 85,9\%$

Lasketut kuivatiheydet olivat harhattomia sikäli, ettei sullonta- tai seulonta-aste korreloinut jään- nöhajonnan kanssa. Keskimääräiset suhteellisen virheen, (estimaatti-mitattu arvo/mitattu arvo)  $\times 100$ , standardipoikkeamat ja raja-arvot esitetään taulukossa 2.

Mikäli kuorman painomittausta ei käytetä, voidaan kuivamassa laskea radioaalto menetelmällä mitatusta kuivatiheydestä. Yksiparametrimittauksessa käytetään syöttötietona vain dielektrisyysvakion reaaliosaa. Kaksiparametrimittauksessa syöttötietoina on tämän lisäksi vaimenemista kuvaava muuttuja. Voitiin todeta, että dielektrisyysvakion avulla voitiin selittää jo 2/3 (65,9 %) kuivatiheyden vaihtelusta, mikäli kuusihake erotettiin omaksi luokakseen (malli (9)).

$$Dd = a + 36,99 \times \epsilon_r' \quad R^2 = 65,9\% \quad (9)$$

jossa  
 $Dd$  = kuivatiheys,  $\text{kg}/\text{m}^3$   
 $a$  = vakio, joka saa arvon 44,1, jos muu kuin kuusihake 20,1, jos kuusihake  
 $\epsilon_r'$  = dielektrisyysvakion reaaliosa

Laskemalla mallit (10a–10e) erikseen eri puulaeille nousi yhteisen mallin selityksaste 79,5 %:iin.

Taulukko 2. Kuivatiheyden suhteellinen arviointivirhe.  
Table 2. Relative error in determining the dry density of chips.

Hakelaji Chip class	Virheen standardipoikkeama Standard deviation		Absoluuttinen ero Absolute difference			
	1	2	Alin arvo — Minimum Menetelmä — Method		Ylin arvo — Maximum	
			1	2	1	2
1 Mänty — Pine	6,29	8,46	-16,4	-17,4	12,2	22,0
2 Koivu — Birch	7,78	5,63	-17,1	-7,5	18,2	18,5
3 Kuusi — Spruce	5,24	3,23	-11,3	-7,5	10,2	5,5
4 Koivu — Birch	4,08	3,04	-9,3	-7,2	8,0	5,2
5 Leppä — Alder	3,58	2,56	-6,0	-3,3	6,3	7,7
Kaikki — All	5,97	5,31	-17,1	-13,0	18,2	16,2

Menetelmä 1 — Method 1: Painomittaus — Weight scaling  
Menetelmä 2 — Method 2: Kehysmitta — Volume scaling

Taulukko 3. Kuivatiheyden suhteellinen arviointivirhe  
sullonta-asteittain.  
Table 3. Relative error in determining the dry density by  
compacting grade.

	Löyhä Loose	Normaali Normal	Tiivis Dense	Erittäin tiivis Very dense
Kuivatiheys, kg/m <sup>3</sup> Dry density, kg/m <sup>3</sup>	121±7,4	143±1,8	180±6,0	200±6,3
Keskimääräinen ero, % Average difference, %	-5,78	-2,17	4,59	5,37

Yksittäiset mallit olivat seuraavat:

$$\begin{aligned} \text{Mä} \quad & 173,20 + 144,48 \times \epsilon_r' - 390,5 \times \ln \epsilon_r' - 20,0 \times Q \\ & R^2 = 62,6 \% \quad (10a) \\ \text{Ko} \quad & 39,00 + 146,50 \times \epsilon_r' - 306,7 \times \ln \epsilon_r' \\ & R^2 = 89,6 \% \quad (10b) \\ \text{Ku} \quad & 57,36 + 16,66 \times \epsilon_r' + 7,5 \times Q \\ & R^2 = 11,5 \% \quad (10c) \\ \text{Ko} \quad & 10,13 - 433,07 \times \epsilon_r' + 1288 \times \ln \epsilon_r' + 34,1 \times Q \\ & R^2 = 49,0 \% \quad (10d) \\ \text{Le} \quad & 97,32 + 20,42 \times \epsilon_r'' \\ & R^2 = 65,5 \% \quad (10e) \end{aligned}$$

Suhteellisen arviointivirheen keskiarvo ei poikennut nolasta (taulukko 2), joten mallit ovat

tässä suhteessa harhattomia, ja standardipoikkeama oli 6,23 (%) koko aineistossa. Mäntyaineistossa virhe oli suurin, 8,5 (%), mutta niin oli kuivamassan vaihtelukin. Seulonta-asteella ei ollut vaikutusta suhteelliseen virheeseen, mutta virhe riippui sullonta-asteesta ( $r=0,379^{***}$ ). Tietoisesti sullonta-astetta vaihdeltiin ainoastaan mäntyhakkeessa. Tässä suhteessa tuloksia voidaan pitää epätydyttävänä (taulukko 3), koska malli sisältää systemaattista virhettä. Vertailun vuoksi mainittakoon, että samalla tavoin laskettu A ja B kosteusnäytteen suhteellinen mittausvirhe oli 3,3 %, joten osa virheestä johtuu kosteuden määrittämisestä.

Taulukon 2 mukaan painomittauksen käytöllä saatiin jopa huonompi tarkkuus kuin kehysmittauksella. Kuitenkin käytännössä tultaneen saamaan tarkempia tuloksia kuorman mittauksessa, jos veden massa lasketaan tilavuusprosentin avulla toisin sanoen painomittauksella saataneen parempia tuloksia. Tämä johtuu systemaattisen virheen poisjännistä.

Kosteus tai kosteussuhde voidaan laskea suoraan dielektristen arvojen perusteella tai laskeamalla veden massan ja kuivamassan arviot ensin.

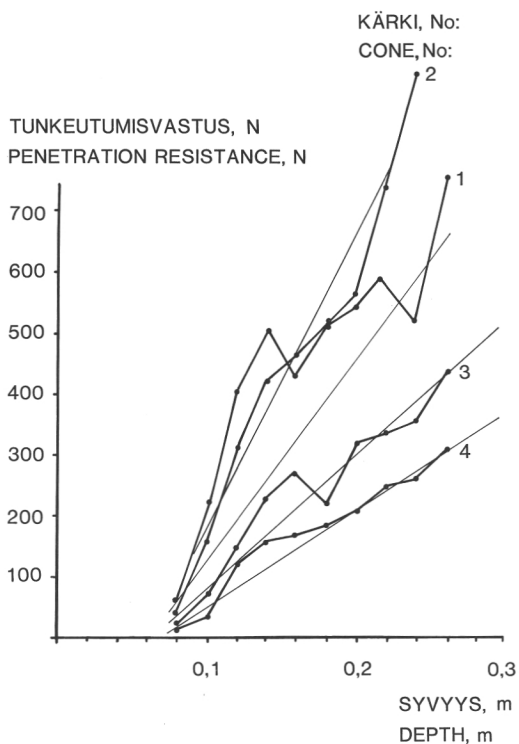
## 5 Tunkeumavastus hakkeessa

Vastusta, joka syntyy työnnettäessä sondia hakekuormaan, tutkittiin Wolpert-aineenkoetuskooneella sijoittamalla kuormittavan männän päähän eri läpimittaisia ja kärkekartioltaan erilaisia terästankoja, joita työnnettiin hakkeella täytettyyn ämpäriin. Työntövoima luettiin tunkeutumisvyödyden funktiona. Koneen kapasiteetti rajoitti työntöno piteuden 270 mm:iin. Hakekuor-

man mittauksissa maksimisyvyys on kymmenkertainen. Käytetyt sondin kärjet olivat:

Sondi	Läpimitta, mm	Kärkikulma, °
1	28	44,5
2	28	31
3	22	31,5
4	16	42





Kuva 3. Tunkeutumisvastus syvyyden funktiona eri kärkityypeillä.

Figure 3. Penetration resistance as a function of depth for different sounding heads.

Ämpärin tilavuus (34 l) mitattiin ja hakkeen massa punnittiin, joten hakkeen tuoretiheys voitiin laskea. Hakkeen kosteus vaihtelee jonkin verran, joten tuoretiheys ei täysin kuvaa hakkeen tiiviyt-  
tä. Hakkeen sullonta-astetta varioitiin.

Tulosten perusteella ei voida päätellä, onko lineaarinen malli (yhtälö 11) tarpeeksi tarkka ekstrapoloitavaksi 10-kertaiseen syvyyteen (kuva 3). Hakkeen tiiviuden vaikutus oli huomattava, ja parhaat mallit olivat additiivisia sisältäen sekä tiheyden että syvyyden.

$$F = (0,0559 \times Dw - 13,8) \times z \quad R^2 = 42,9\% \quad N = 935 \quad (11)$$

jossa

F = tunkeumavastus, N/mm<sup>2</sup>

Dw = tuoretiheys kg/m<sup>3</sup>

z = syvyys, m

Uusvaaran (1969) mukaan hakkeen tuoretiheys tehtaalla oli mäntyhakeella 366 (340–401) kg/m<sup>3</sup> ja kuusihakeella 357 (308–396) kg/m<sup>3</sup>.

Mallin (11) mukaan halkaisijaltaan 22 mm:n sondia pitäisi siis työntää 2,8 kN:n voimalla löyhään (Dw = 300 kg/m<sup>3</sup>) ja 8,1 kN voimalla tiiviiseen (Dw = 400 kg/m<sup>3</sup>) hakeeseen 2,5 m:n syvyyteen kuormaan, eli käytännössä sondi tulisi mitoittaa n. 10 kN:n voimalle. Saattaa tosin olla, että pieniläpimittaisen astian käyttö tässä kokeessa yliarvioi tarvittavan voiman, koska astian reunat rajoittavat hakepalasten liikkumista.

Koska sondin tunkeutumisvastus näyttää olevan voimakkaasti sidoksissa hakkeen tiivyyteen, saattaisi voima-anturin liittäminen mittalaitteeseen lisätä informaation määrää hakkeen ominaisuuksista.

## 6 Tulosten soveltaminen käytäntöön

Hakkeen mittaustaajuus vaihteli 110–130 MHz, joka on hiukan alempi kuin turpeen (130–145 MHz, Tiuri & Toikka 1982). Suosondi voidaan siis pienin muutoksin muuttaa hakekuorman ominaisuuksien mittaamiseen.

Tutkimusta voidaan pitää esitutkimuksena, jossa tutustutaan mittaustekniikan periaatteisiin ja niiden soveltamiseen hakekuorman ominaisuuksien mittaamiseen. Esitettyjä malleja ei suoraan voida käyttää sondin tulosten analysoimiseksi, vaan sondi on kalibroitava ja mallit laadittava erikseen sondimittaukseen. Täten tulosten ulkoisella luotettavuudella ei ole samaa merkitystä kuin tapauksessa jolloin kehitetään mittaustekniikan käytännön sovellutuksia.

Tämän tutkimuksen tulosten perusteella hakekuormassa olevan veden tilavuus ja/tai massa voidaan mitata 95 % tapauksista alle ±5,7 %:n tarkkuudella. Käytännössä hakekuorman mittauksessa voidaan päästä vieläkin suurempaan tarkkuuteen. Hakkeen kuivamassan määrittäminen onnistuu lähes samalla tarkkuudella. Koska sekä teoriassa että käytännössä näyttää mahdolliselta arvioida kuivatiheyttä mikroaaltomittauksin, menetelmää voitaneen kehittää myös kehysmittauksen apuvälineeksi, jolla kuorman kuivamassa voidaan arvioida riittävän tarkasti.

Mikroaaltomenetelmä näyttää soveltuvan hakekuorman ominaisuuksien mittaamiseen. Kosteu-  
den mittausalue on laajempi kuin kirjallisuus-

dessa mainittu 15–50 % (Kärkkäinen 1977). Myös mahdollisuus kuivatiheyden määrittämiseen lisää menetelmän käyttömahdollisuuksia. Seuraavassa vaiheessa on tutkittava sondin käyttäytymistä hakekuorman sisällä, koska vasta silloin

voidaan menetelmän toimivuudesta saada luotettava kuva. Vaikka menetelmä näyttääkin mahdolliselta, haittana tulee aina olemaan menetelmän soveltuvuus vain sulalle hakkeelle.

## Kirjallisuus

- Cooper, D. W., Mueller, R. A. & Schertler, R. 1976. Measurement of lake ice thickness with a short-pulse radar system. NASA, Washington. NASA-TN D-8189.
- Fisher, M. 1985. Vaneriviulun kosteuden mittaaminen radioaaltojen avulla. Teknillinen korkeakoulu, Sähköteknillinen osasto. Diplomityö. 66 s.
- Hakkila 1984. Forest chips as fuel for heating plants in Finland. Tiivistelmä: Metsähake lämpölaitosten polttoaineena Suomessa. Folia Forestalia 586. 62 s.
- 1985. Pienpuun ja metsätähteen korjuu energiakäyttöön. Julkaisussa: Hakkila, P. (toim.). Metsäenergian mahdollisuudet Suomessa. PERA-projektin väliraportti. Summary: The potential of forest energy in Finland. Interim report of PERA project. Folia Forestalia 624: 8–22.
- Hallikainen, A. 1977. Dielectric properties of sea ice at microwave frequencies. Helsinki University of Technology, Radio Laboratory, Report S 94. 53 s.
- Hyytiä, J. J. 1984. Hakekuorman kosteuden ja kiintotilavuuden mittaus. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. Pro gradu -tutkielma. 59 s.
- James, W. L. 1977. Dielectric behaviour of Douglas-Fir at various combinations of temperature, frequency and moisture content. Forest Products Journal 27(6):44–48.
- Kärkkäinen, M. 1977. Puu sen rakenne ja ominaisuudet. Helsingin yliopiston monistuspalvelu. 442 s. ISBN 951-99123-3-9.
- Lankinen, A. 1989. Puun sähköiset mittausmenetelmät. Osa 2. Mikroaaltomittaus. Valtion teknillinen tutkimuskeskus, Tiedotteita 1058. 21 s + liitt.
- Siimes, H., Tarvainen, V. & Peräniitty, M. 1986. Suurtaajuuskuivatuksen käyttömahdollisuudet mekaanisessa metsäteollisuudessa. Imatran Voima Oy, Helsinki. Tutkimusraportteja IVO-A-O4/86
- Skaar, C. 1972. Water in wood. Syracuse University Press. 217 s.
- Sorsa, B. & Nykänen P. 1952. Puun dielektrisistä ominaisuuksista. Valtion teknillinen tutkimuslaitos, Tiedotus 88.
- Ståhl, S. 1984. Givare för spånskiveindustrin, som fungerar med hjälp av radiovågor. Tekniska högskolan, elektrotekniska avdelningen. Diplomarbete. 103 s.
- Tinga, W. R. 1969a. Multiphase dielectric theory — applied to cellulose mixtures. University of Alberta, Ph. D. dissertation.
- 1969b. Dielectric properties of Douglas Fir at 2.45 GHz. Journal of Microwave Power 4(3): 162–164.
- Tiuri, M., Sihvola, A. & Nyfors, E. 1982. Microwave sensor for snowpack wetness and density profile measurement. 12th European Microwave Conference, Microwave Exhibitions and Publishers Ltd, Kent, UK. s. 157–160.
- & Toikka, M. 1982. Radiowave probe in situ water content measurement of peat. Tiivistelmä: Radioaaltoanturi turpeen vesipitoisuuden maastomittaukseen. Suo 33(3): 65–70
- Tolonen, K., Tiuri, M., Toikka, M. & Saarilahti, M. 1982. Radiowave probe in assessing the yield of peat energy in peat deposits in Finland. Seloste: Radioaaltoanturin käyttömahdollisuudet turpeen määrän ja energiasisällön selvittämiseen Suomen soissa. Suo 33(4–5): 105–112.
- Uusvaara, O. 1969. Sahahakkeen tiheys ja paino. Summary: On density and weight of sawmill chips. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 67(3). 44 s.
- Verkasalo, E. 1987. Metsähakkeen kosteuden ja kuivamassan mittaus kuormaotantamenetelmällä. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos, Pro gradu -tutkielma. 50 s.

*Total of 20 references*

## Summary

### Measuring of the chip load properties using microwave sounding

Even though the microwave aquametry has been used for tens of years and many applications have been developed, applications in forestry and forest industries are rare. Microwave techniques can be used in different ways when studying the properties of wood, either the detectors are stationary and the material passes the detectors, or the resonator is filled with studied material, or the detector is pushed into the material. In this paper the microwave sounding principle is discussed.

The dielectric properties of 5 different chip types were measured using a resonator and the density and moisture of the samples determined. As the mass of water affects on the microwave field more than the ratio water/wood the coefficient of determination for the model of water volume percent was higher ( $R^2 = 94,7 \%$ ) than that of

moisture content ( $R^2 = 85,6 \%$ ). The dry mass of chips can be determined either by subtracting the mass of water, if the weight and volume scaling are used or the dry density can be determined based on dielectric properties, if volume scaling is used. In both cases the average error was less than 6 %, but in practice the weight scaling will be more accurate, however, because the dry density based on dielectric model contained some systematic error due to multicollinearity between moisture and dry density.

Based on observations on the penetration force needed to push the steel rod through small chip sample it is assumed, that the force about 10 kN is needed for pushing the probe through the lorry load.







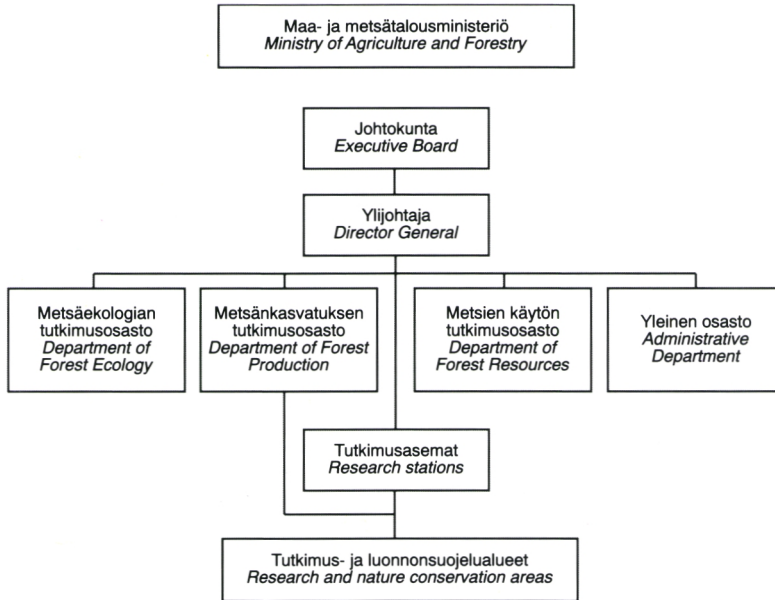








METSÄNTUTKIMUSLAITOS — *THE FINNISH FOREST RESEARCH INSTITUTE*



**Metsäntutkimuslaitos — *The Finnish Forest Research Institute***

Unioninkatu 40 A, FIN-00170 Helsinki, Finland

tel. +358-0-857 051, fax +358-0-625 308, telex 121298 metla sf

Ylijohtaja — *Director General*

Eljas Pohtila

Hallintojohtaja — *Administrative Director*

Tero Oksa

Tiedotuspäällikkö — *Head of Information*

Marja Ruutu

**Metsäekologian tutkimusosasto — *Department of Forest Ecology***

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Eero Paavilainen

**Metsänkasvatuksen tutkimusosasto — *Department of Forest Production***

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Jari Parviainen

**Metsien käytön tutkimusosasto — *Department of Forest Resources***

Tutkimusjohtaja — *Research Director* Risto Seppälä

**Tutkimusasemat — *Research Stations***

Joensuu

Parkano

Kannus

Punkaharju

Kolari

Rovaniemi

Muhos

Suonenjoki

- No 794 Rikala, Risto: Taimitarhalannoituksen vaikutus männyntaimien jälkikasvuun ja istutuksen jälkeiseen menestymiseen.  
Effect of nursery fertilization on incidence of summer shoots and field performance of Scots pine seedlings.
- No 795 Petäjäistö, Leena & Selby, J. Ashley: Piensahojen kehittämisedellytykset. Small sawmill development possibilities.
- No 796 Gustavsen, Hans Gustav: Vähäpuustoisten männiköiden ja kuusiköiden kehitys.  
Development of understocked pine and spruce stands.
- No 797 Saarsalmi, Anna, Palmgren, Kristina & Levula Teuvo: Harmaalepän ja rauduskoivun biomassan tuotos ja ravinteiden käyttö energiapuuviljelmällä. Biomass production and nutrient consumption of *Alnus incana* and *Betula pendula* in energy forestry.
- No 798 Ollonqvist, Pekka & Kajanus, Miika: Metsänomistajan taloudellisten tavoitteiden merkitys metsänuudistamistavan valinnassa.  
Significance of private forest owners' economic goals in the forest stand regeneration decision.
- No 799 Penttinen, Markku: Tulos- ja kustannuslaskentamallien soveltuvuus yhteismetsätalouteen.  
Applicability of profit and cost accounting models to jointly-owned forests.
- No 800 Pesonen, Mauno & Hirvelä, Hannu: Liiketaloudelliset harvennusmallit Etelä-Suomessa.  
Thinning models based on profitability calculations for southern Finland.
- No 801 Mäkinen, Harri & Uusvaara, Olli: Lannoituksen vaikutus männyn oksikkuuteen ja puuaineen laatuun.  
Effect of fertilization on the branchiness and the wood quality of Scots pine.
- 1993
- No 802 Pesonen, Mauno, Jämsä, Jari & Hirvelä, Hannu: Harvennushakkuiden edullisuusvertailu metsälötasolla.  
Profitability comparisons of thinnings at the forest holding level.
- No 803 Hakkila, Pentti & Kalaja, Hannu: Ketjukarsinta ensiharvennusmännikön korjuuratkaisuna.  
Flail delimiting in the first commercial thinning of Scots pine.
- No 804 Saarilahti, Martti: Mikroaaltosondin soveltuvuus hakekuorman käyttöarvon mittaukseen.  
Measuring of the chip load properties using microwave sounding.
- No 805 Salminen, Olli: Männikön ja kuusikon liiketaloudellinen vajaatuuotisuus.  
Profitability of growing understocked Scots pine and Norway spruce stands.