

**Metsätehon raportti 152**  
**4.8.2003**

# **Laserrelaskooppimittauksen tarkkuus ja ajanmenekki**

*Jouni Kalliovirta*  
*Tapio Räsänen*

# **Laserrelaskooppimittauksen tarkkuus ja ajanmenekki**

**Jouni Kalliovirta  
Tapio Räsänen**

Metsätehon raportti 152  
4.8.2003

Konsortiohanke: Helsingin yliopisto, Masser Oy, Metsähallitus,  
Metsäliitto Osuuskunta, Metsätalouden kehittämis-  
keskus Tapio, Stora Enso Oyj ja UPM-Kymmene  
Oyj

Jakelu: Metsätehon osakkaat

Asiasanat: mittauslaite, mittaustarkkuus, laser, relaskooppi

© Metsäteho Oy

Helsinki 2003

## SISÄLLYS

<b>TIIVISTELMÄ.....</b>	<b>4</b>
<b>1 JOHDANTO .....</b>	<b>5</b>
<b>2 LASERRELASKOOPPI.....</b>	<b>6</b>
2.1 Mittauslaitteen kehitys .....	6
2.2 Mittausperiaate.....	7
2.3 Mittauslaitteen rakenne .....	7
2.4 Mittausmenetelmä.....	9
<b>3 TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO.....</b>	<b>10</b>
<b>4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU.....</b>	<b>12</b>
4.1 Lämpimän mittauksen tarkkuus.....	12
4.1.1 UPM-Kymmenen koealat .....	12
4.1.2 Hyytiälän koealat .....	13
4.2 Suunnan mittauksen tarkkuus .....	15
4.3 Etäisyyden mittauksen tarkkuus .....	15
4.4 Pituuden mittauksen tarkkuus .....	16
4.5 Tilavuusennusteen tarkkuus.....	16
4.6 Ajanmenekki .....	17
4.7 Laitteen käytettävyys .....	18
<b>5 PÄÄTELMIÄ JA KEHITYSSUUNTIA.....</b>	<b>18</b>
<b>KIRJALLISUUS .....</b>	<b>20</b>
<b>LIITE</b>	

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksessa tarkasteltiin Metsänmittauksen tehostaminen –hankkeessa kehitetyn uuden mittauslaitteen, laserrelaskoopin, mittaustarkkuutta sekä mittauksen ajanmenekkiä. Laitekehittelyn tavoitteena on tehostaa metsänmittausta uuden teknologian ja menetelmien avulla. Tarkkuus- ja ajanmenekkitutkimukset tehtiin laserrelaskoopin toisella kehitysversiolla. Tulokset pätevät pääosin myös laitteen viimeisimpään, III prototyyppiin. Puun läpimitan mittausta perustuu relaskoopiperiaatteeseen, jossa etäisyys mitataan laserilla. Läpimitan voi mitata vapaasti valittavalta korkeudelta. Puun pituuden mittausta perustuu kulma- ja etäisyysmittauksiin. Puutunnusten ja puiden sijaintien mittaaminen onnistuu laserrelaskoopilla koealan keskipisteestä käymättä puiden luona. Laserrelaskooppi koostuu laseretäisyysmittarista, vakioetäisyydellä olevasta leveydeltään säädettävästä relaskoopin hahlostasta, elektronisesta kompassista sekä kaltevuusmittarista. Laitteen arvioimiseksi tutkittiin mittaustarkkuutta, mittauksen ajanmenekkiä sekä käytettävyyttä. Laserrelaskoopin tarkkuutta tutkittiin läpimitan, pituuden, suunnan ja etäisyyden mittauksissa. Lisäksi tarkasteltiin koealoille laskettuja tilavuuksia.

Läpimitan mittausta onnistui tutkimuksen mittausetäisyyksillä (1,4–15,0 m) lähes harhattomasti. Mittausten hajonta oli keskimäärin 8,2 mm. Läpimitan mittaustarkkuutta selittivät mittausetäisyys, hahlon leveys, puun mittausaika ja rinnankorkeusläpimitta. Pituuden mittausta oli harhattomasti. Hajonta oli keskimäärin 49 cm. Mittauskokemus vaikutti selvästi läpimitan ja pituuden mittaustarkkuuteen. Puun sijainnin mittauksessa sillä ei ollut merkitystä. Suunta koealan keskipisteestä puulle saatiin mitattua lähes harhattomasti. Suuntamittausten hajonta oli keskimäärin 3,8°. Etäisyys mitattiin keskimäärin 6,7 cm liian suureksi, hajonta oli 13,5 cm. Tilavuusennusteen hajonta oli keskimäärin 4,5 m<sup>3</sup>/ha. Laserrelaskoopilla mitattiin koealalta runkolokusarja, joten tilavuus saatiin ennustettua keskipuumenetelmää tarkemmin. Laserrelaskoopimenetelmän tilavuusennusteen tarkkuutta selittivät koealan pohjapinta-ala sekä puukohtainen mittausaika. Koealan mittaukseen kului aikaa keskimäärin 15,5 min ja yhden puun mittaukseen 85 s. Koealan mittauksen ajanmenekki riippui pohjapinta-alasta, pääpuulajista ja näkyvyydestä.

Koska vertailumittaukset tehtiin perinteisin mittavälinein, myös vertailumittaukset sisälsivät virhettä. Tällöin laserrelaskoopin luotettavuudesta saatiin aliarvio. Mittaustarkkuus oli parantunut ensimmäisestä prototyypistä merkittävästi. Kokopäiväinen mittausta onnistui laitteella kohtuullisin rasituksin. Mittauksia vaikeutti laitteen kaltevuuskulmamittarin liian suppea vaihteluväli ( $\pm 45^\circ$ ). Kevättalvella 2003 valmistuneessa laitteen III prototyypissä kaltevuuskulmamittarin vaihteluväliä oli laajennettu. Muutosten jälkeen positiivisia kaltevuuskulmia voidaan mitata aina 79 asteeseen saakka. Laserrelaskoopilla mitattavasta kohteesta saadaan entistä tarkempaa tietoa. Tiedon luotettavuutta on mahdollista arvioida. Laite on parhaimmillaan lähellä hakkuukypsyyttä olevassa järeässä puustossa, jossa näkyvyys on hyvä. Tärkeimpänä jatkotutkimuskohteena on mittausta menetelmä, jossa läpimitat voidaan mitata vapaasti valituilta korkeuksilta. Laitteen tärkeimmäksi kehittämis-kohteeksi arvioitiin läpimitan mittauksen tehokkuuden lisääminen digitaalitekniikan avulla.

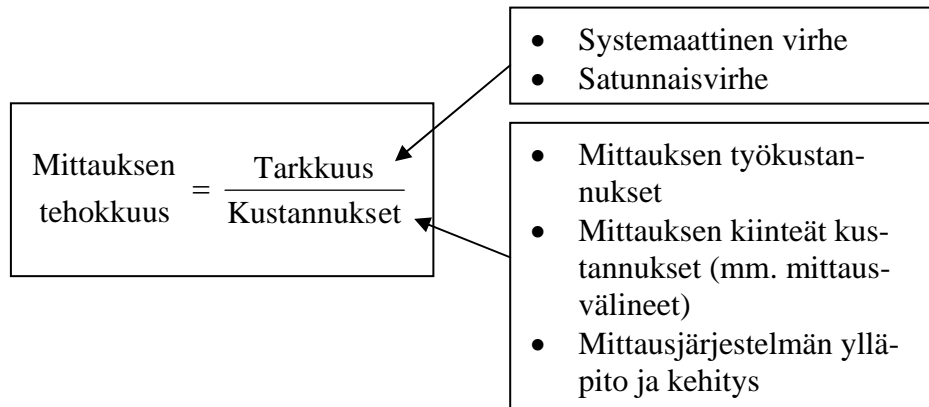
# 1 JOHDANTO

Metsänmittauksen tehostaminen on viime aikoina painottunut vahvasti kaukokartoitustutkimukseen. Maastomittauksen ja mittavälineiden kehittäminen on jäänyt vähemmälle. Kuitenkin puuston tarkka mittaus ja erityisesti puuston laadun arviointi on tällä hetkellä mahdollista vain maastomittauksin. Kaukokartoitusmenetelmienkin käyttö perustuu pitkälti tarkan ja luotettavan maastodatan käyttöön kuvatulkinnessa. Siten tarve maastomittauksen kehittämiselle on ilmeinen.

Metsänmittauksen tietotarpeet lisääntyvät koko ajan. Metsäsuunnittelussa puuston kuvaus on mahdollista tehdä nykyisin jo varsin perusteellisesti puusto-ositteittain. Maastotöissä kerätään kuitenkin entistä enemmän metsikköä ja metsäluontoa kuvaavia tunnuksia ja paneudutaan metsänkäsittelyvaihtoehtojen arvioimiseen, jolloin puustotunnusten mittausten tehostamiseen on tarvetta. Tulevaisuudessa metsäsuunnittelu kehittynee entistä enemmän ennakkokuviointia, automaattista puustotunnusten tulkintaa ja toimenpiteiden päivitystietoa hyödyntäväksi, eikä kaikilla kuvioilla enää välttämättä käydä puustotietoja mittaamassa. Siten tehtävien puustomittausten laatuvaatimus kasvaa, koska mittauksia voidaan käyttää myös muiden kuvioden puuston kuvaamiseen. Metsäsuunnittelussa tuotettava kuviotieto on monenlaisen metsätaloudessa tehtävän päätöksenteon ja toimenpiteiden suunnittelun perusta. Esimerkiksi leimikon suunnittelussa ja katkontavaihtoehtojen ja hinnoittelun simuloinneissa ei laadukasta ja ajantasaista kuviotietoa parempaa tietolähdettä ole.

Puiden laadun arviointi on tulevaisuudessa laatuvaatimusten hinnoittelun tullessa käyttöön erityisen tärkeää. Myös puuston paikantaminen on yhä tärkeämpää (metsikön sisäisen vaihtelun kuvaus, tilajärjestys, ajourien sijoittuminen, säästöpuuryhmien kuvaus). Lisäksi metsästä mitattavalta tiedolta vaaditaan entistä parempaa luotettavuutta. Siksi puuston kuvaus olisi tehtävä yksittäisten puiden eikä puuston keskitunnusten avulla. Metsikön kasvua ennustavat simulaattorit toimivat nykyisin pääasiassa niin, että kuviolle generoidaan keskitunnuksista laskentapuujoukko, joka ei aina kuvaa riittävän hyvin metsikön puustoa. Erityinen ongelma tämä on erirakenteisissa ja erikäisissä puustoissa, mm. Pohjois-Suomessa. Kasvumallien käytön lisäksi yksittäisistä puumittauksista muodostettu yksin puin kuvaus tarvitaan myös katkonnan simuloiteja varten.

Tämän kaiken keskellä mittauksen tehokkuusvaatimus kasvaa. Mittauksen tehokkuus määräytyy mittauksen tarkkuuden ja kustannusten suhteesta (kuva 1). Mittaus sinänsä ei ole muuta kuin väline laajemmassa päätöksentekoprosessissa, jossa tarvitaan metsää kuvaavaa tietoa. Prosessien tehostamisessa keskeistä on mittausten tarkoituksenmukainen kohdentaminen ja otannan käyttö mahdollisuuksien ja tietotarpeen rajoissa. Mittaustyön tehostamisella pyritään tuottamaan tarpeet täyttävää mittaustietoa mahdollisimman pienin kustannuksin. Mittauksen tulevaisuuden maastomittauslaitteella on siis oltava tarkkaa ja nopeaa sekä mittaajan kannalta helppoa. Lisäksi laitteen on oltava hankintakustannuksiltaan kohtuullinen.



**Kuva 1.** Mittauksen tehokkuuden komponentit.

Koealamittausten tuntuva tehostaminen on tullut viime vuosina mahdolliseksi tietotekniikan nopean kehityksen myötä. Mittauksia on jo tähän mennessä pyritty tehostamaan erilaisten elektronisten mittausvälineiden kuten dendrometrioiden, elektronisten mittasaksien ja pituuden mittauslaitteiden avulla. Kuitenkaan metsän mittauksessa käytettyjen uutta teknologiaa hyödyntävien mittausvälineiden avulla ei ole pystytty merkittävästi nostamaan tehokkuutta. Uusien mittauslaitteiden ongelmiksi ovat muodostuneet usein laitteen käytettävyys, tehottomuus sekä hinta (esim. Skovsgaard ym. 1998 ja Parker & Matney 1999). Lisäksi laitteilla ei ole ollut mahdollista mitata jotain metsänmittaukselle oleellista suuretta.

Metsänmittauksen tehostaminen –niminen hanke päätettiin käynnistää vuonna 2001 Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen professori Jouko Laasasenahon aloitteesta. Mittauslaitteen kehitystyön otti tehtäväkseen Masser Oy. Laitteen testauksesta vastasi pääasiassa Helsingin yliopisto. Hanketta koordinoi Metsäteho Oy. Tekesin lisäksi hanketta rahoittivat Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio, maa- ja metsätalousministeriö, Metsähallitus, Metsäliitto, Stora Enso Oyj sekä UPM-Kymmene Oyj. Hanke päättyi kesäkuussa 2003.

## 2 LASERRELASKOOPPI

### 2.1 Mittauslaitteen kehitys

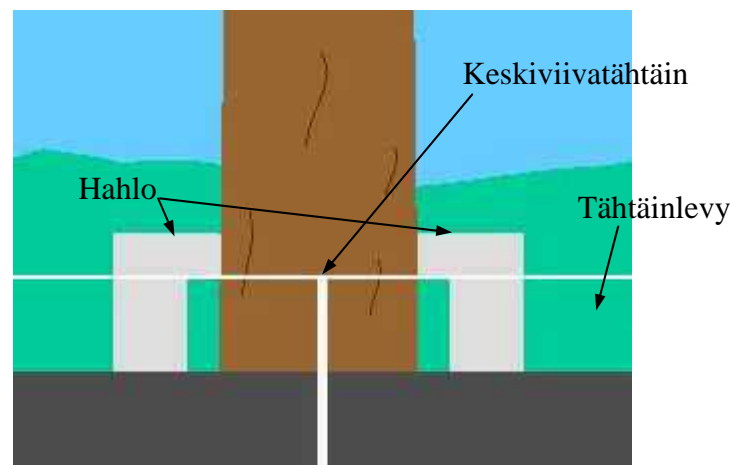
Metsänmittauksen tehostaminen -hankkeessa kehitettiin laserteknologiaa hyödyntävä mittauslaite, jolla pystytään mittaamaan keskeiset koealatunukset (Räty 2001, Uurtamo 2002). Mittauslaitetta kutsutaan laserrelaskoopiksi. Laserrelaskoopin kehitystyö alkoi jo vuonna 1998. Tarve maastomittausten kehittämiseksi ja erityisesti puun läpimitan mittaamista tehostavalle laitteelle oli ollut olemassa jo pitkään, mutta vasta tietotekniikan viimeaikainen kehitys mahdollisti testattavan laitteen synnyn. Erityisesti lasertekniikan viimeaikainen kehitys oli avainasemassa. Kuten aina, kehitystyö on

pitkäjännteistä ja vastoinikäymisiltä ei useinkaan voida välttyä. Projektia viedtiin kuitenkin eteenpäin ja tuloksena oli kolme laserrelaskoopin prototyyppiä.

Masser Oy lähti kehittämään laitetta periaatteesta, jossa relaskoopin hahlo oli kiinteä ja varsi pituudeltaan muuttuva (I prototyyppi). Näin mittalaitteesta saatiin kooltaan pieni, mutta sen mittausominaisuudet eivät olleet odotetun kaltaiset. Siksi laitteen kehittämissä siirryttiin pian kiinteän varren ja muuttuvan hahlon käyttöön (II ja III prototyyppi). Tämä periaate osoittautui toimivaksi.

## 2.2 Mittausperiaate

Puun läpimitan mittaaminen perustuu relaskoopiperiaatteeseen, jossa hyödynnetään laseria etäisyyden mittaamisessa. Muuttuvaleveysistä hahloa säädetään sähköisesti käsikahvan vipukytkimellä. Puun läpimitan mittausta varten hahlon sivut säädetään puun kyljille (kuva 2). Läpimitan voi mitata vapaasti valitulta korkeudelta. Puun pituuden laskemiseksi mitataan etäisyys puuhun sekä kaltevuuskulmat puun syntypisteeseen ja latvaan. Lisäksi puun sijainti koealalla saadaan selville etäisyyden ja suuntakulman avulla. Koealamittaus laserrelaskoopilla tapahtuu koealan keskipisteestä mittaajan tarvitsematta kulkea puiden ja koealan keskipisteen väliä. Mittaustiedot tallentuvat tiedonkeruuyksikköön.



**Kuva 2.** Hahlon muotoilu ja tähtäyslinja.

## 2.3 Mittauslaitteen rakenne

Laserrelaskoopiin on integroitu tiedonkeruuyksikkö, relaskoopitähtäin, anturointi relaskoopin hahlon leveyden mittaamiseksi, laseretäisyysmittari ja elektroninen kompassi, johon on liitetty kaltevuuskulma-anturi. Laitteeseen on myös mahdollista liittää sijainnin määrittävä laite (GPS-vastaanotin). Kuvassa 3 on laserrelaskoopin kolmas kehitysversio. Sen suunnittelussa oli

otettu huomioon II prototyypin testauksessa havaittuja ongelmia. Tärkeimpänä niistä oli kaltevuuskulma-anturin vaihteluvälin laajennus  $\pm 45$  asteesta  $-45 - +79$  asteeseen. Eri antureista tulevat mittaustiedot tallentuvat tiedonkeruuyksikköön, johon on ohjelmoitu myös jonkin verran laskentaa sekä mittausohjelma. Mittauslaitteessa on lisäksi sarjaportti, jota käytetään laitteen akun lataamiseen, mittaustiedon siirtoon laitteesta PC:lle sekä mittausohjelman lataamiseen. Tiedonsiirto tapahtuu sarjaliikennekaapelin välityksellä hyperterminal-ohjelmaa käyttäen. Painoa tutkimuksessa käytetyllä laitteella oli noin 2,5 kg ja tuotantoversioon tulevalla laitteella n. 2 kg. Kuljetamisen helpottamiseksi laite on kokoontaitettava. Laitteen pituus mittausasennossa on 92 cm ja kuljetusasennossa 51 cm.



**Kuva 3.** Laserrelaskoopin III prototyyppi. Laitteen runkoon on kiinnitetty leveydeltään säädettävä hahlo vakioetäisyydelle silmästä. Hahlon liukumekanismiin alla on laseretäisyysmittari. Rungon keskiosassa on prosessointiyksikkö sekä näyttö. Prosessointiyksikön edessä on tähtäinlevy. Kompassi ja kaltevuusmittari ovat rungon alapuolella laitteen perässä.

Mittauslaitteen kantavana ajatuksena on vakioida etäisyys silmän ja hahlon välillä. Tämän vuoksi laitteessa on poskituki, jonka tarkoitus on olla jokaisessa mittauksessa posken samassa kohdassa ja edelleen silmän pinnan kanssa samalla etäisyydellä hahlostä. Tässä laitteessa tuen etäisyys hahlostä eli relaskoopin varsi on 717 mm. Prosessointiyksikön etupuolelle on asennettu läpinäkyvä tähtäinlevy. Tähtäys laitteella tapahtuu tähtäinlevyn yläreunan sekä hahlon muodostamaa tähtäyslinjaa pitkin (kuva 2). Tähtäinlevyn keskelle on uurrettu pystysuora tähtäysviiva, joka kohdistetaan mittauksissa rungon keskelle. Samalla laser kohdistuu keskelle runkoa. Kuvissa 4 ja 5 näkyy hyvin mittaajan ammunnanomainen mittausasento.



## 2.4 Mittausmenetelmä

Mittaaminen sekä tietojen hyväksyminen tapahtuu painamalla käsikahvan liipaisinta. Jokaisen puun kohdalla tiedostoon tallennetaan puun yksilöivät tunnukset: koealan numero, puulaji (numero) ja puun numero. Jokaisesta puusta mitataan ensin kaltevuuskulma syntypisteeseen, joka tallentuu tiedostoon. Kun laitteella seuraa runkoa syntypisteestä ylöspäin, laite laskee mittauskorkeutta syntypisteen kaltevuuskulmatietoa ja etäisyyttä hyväksi käyttäen ja näyttää korkeuden näytössä pienellä (noin sekunnin) viiveellä. Etäisyyttä laite mittaa samalla, kun runkoa seurataan. Puun läpimitan mittaamista varten tietyltä korkeudelta haetaan ensin mittauskorkeus ja sen jälkeen ajetaan hahlon sivut puun kyljille (kuva 2), josta mittaus tehdään liipaisinta painamalla. Läpimitan mittauksessa laite tallentaa suuntakulman, kaltevuuskulman, mittausetäisyyden etutähtäimestä puun kylkeen ja relaskoopin aukon leveyden. Näistä tiedoista laite on edelleen ohjelmoitu laskemaan ja tallettamaan vaakasuoran etäisyyden laitteen perästä puun kylkeen, mittauskorkeuden ja puun läpimitan. Kuvassa 4 laserrelaskoopilla mitataan puun läpimittaa.

Valokuvat Jouni Kalliovirta



**Kuva 4.** Puun läpimitan mittausta.

Laitteen mittausohjelmassa pituuskoepuut valitaan systemaattisesti. Joka n:s puu puulajeittain on pituuskoepuu. Tämän lisäksi pituus mitataan niistä puista, joiden läpimitta on mitattu selvästi rinnankorkeutta ylempää. Tällöin runkokäyrien avulla voidaan ennustaa puun rinnankorkeusläpimitta. Koska läpimitan mittauksen yhteydessä kaltevuuskulma syntypisteeseen ja etäisyys puuhun on jo mitattu, puun pituuden mittaamiseksi tarvitsee mitata vain kaltevuuskulma latvaan (kuva 5). Eri anturien antamista tiedoista laite laskee

puun pituuden ja tallentaa sen tiedostoon. Pituuden lisäksi laitteella voidaan mitata laatukorkeuksia, kuten esim. oksarajan korkeus. Koko mittauspäh-tuman ajan mittaajan pitää pysyä samassa paikassa. Lämpimitan mittauksessa sekä syntypiste että puun runko mitattavalta korkeudelta pitää olla näkyvis-sä. Pituuden mittausta varten on lisäksi puun latvan näyttävä. Niissä mitta-uksen vaiheissa, joissa mitataan etäisyys laserilla, tulee näkymä laitteen ja puun rungon välillä olla esteetön.



**Kuva 5.** Puun syntypisteen ja pituuden mittausta.

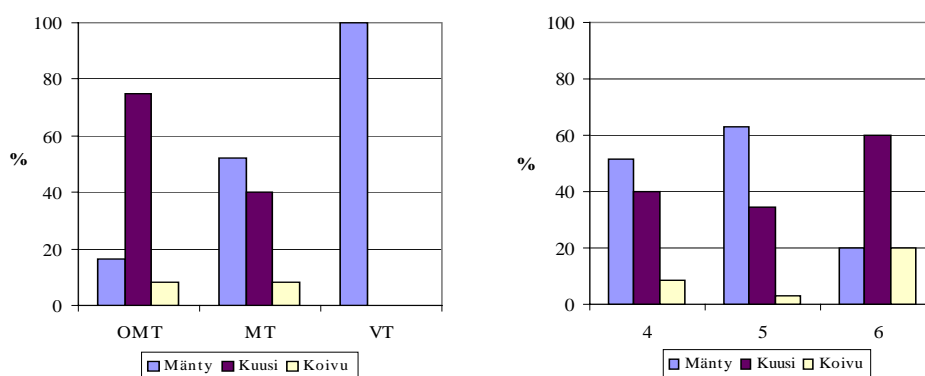
### 3 TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO

Tutkimuksessa uuden mittauslaitteen II prototyypillä mitattiin kaksi erillistä koeala-aineistoa. UPM-Kymmenen koealojen avulla oli tarkoitus saada käsitys mittauslaitteen soveltuvuudesta ammattimaiseen metsänmittaukseen sekä tietoa käytännön mittaustarkkuudesta. Erityisesti tutkittiin läpimitan mittauksen tarkkuutta sekä koealamittauksen ajanmenekkiä. Kaikki UPM-Kymmenen koealat mittasi sama henkilö. Aineisto sisälsi 75 koealaa UPM-Kymmenen omistamilla mailla Etelä-Suomessa. Aineisto on kuvattu taulukossa 1 ja kuvassa 6.

Hyytiälästä valittiin tutkimukseen mukaan neljä koealaa. Näillä koealoilla tutkittiin etäisyyden, suunnan, pituuden sekä läpimitan mittaustarkkuutta. Tätä tavoitetta silmällä pitäen tutkimukseen valittiin mukaan näkyvyydel-tään hyviä koealoja, joilla päästiin tarkastelemaan laitteen ominaisuuksia. Mittauksia haittaavia oksaisia puita tai alikasvosta ei ollut. Lisäksi selvitet-tiin eri mittaajien välisiä eroja sekä mittauskokemuksen merkitystä. Mitta-uksissa oli mukana UPM-Kymmenen aineiston mitanneen henkilön lisäksi viisi koehenkilöä. Hyytiälän aineisto on kuvattu taulukossa 2. Vertailumit-taukset tehtiin perinteisillä mittavälineillä laserrelaskoopin mittaustarkkuu-den arvioimiseksi. Puista mitattiin sekä laserrelaskoopi- että vertailumene-telmällä samat tunnuksat. UPM-Kymmenen aineistossa vertailumittaukset tehtiin kahden hengen mittausryhmällä.

TAULUKKO 1 UPM-Kymmenen koala-aineisto: mitattujen puiden yleistiedot

Läpimitta (mm)	N, kpl	Keskiarvo	Hajonta	Minimi	Maksimi
Mänty	348	189	65	51	394
Kuusi	352	171	80	31	472
Koivu	111	153	70	33	375
Haapa	4	255	162	128	485
Leppä	8	100	21	72	129
Raita	1	205	0	205	205
Pihlaja	1	86	0	86	86
Pituus (m)					
Mänty	65	14,5	4,3	6,4	25,8
Kuusi	70	14,6	6,1	3,2	28,1
Koivu	26	15,7	5,5	6,7	28,7



**Kuva 6.** UPM-Kymmenen koalojen jakautuminen kasvupaikan ja kehitysluokan (4 = nuori kasvatusmetsikkö, 5 = varttunut kasvatusmetsikkö ja 6 = uudistuskypsä metsikkö) mukaan pääpuulajeittain.

TAULUKKO 2 Hyytiälän koala-aineisto: mitattujen puiden yleistiedot

		N, kpl	Keskiarvo	Hajonta	Minimi	Maksimi
Läpimit- ta, mm	Mänty	27	186	75	74	349
	Kuusi	26	324	71	245	545
Suunta, °	Mänty	27	186	97	30	355
	Kuusi	26	207	105	28	349
Etäisyys, m	Mänty	27	4,81	2,78	0,80	10,50
	Kuusi	26	6,68	2,80	2,50	11,30
Pituus, m	Mänty	5	15,94	4,51	10,10	20,00
	Kuusi	5	28,52	2,89	26,10	32,60

## 4 TULOKSET JA TULOSTEN TARKASTELU

### 4.1 Lämpimitan mittauksen tarkkuus

#### 4.1.1 UPM-Kymmenen koealat

Lämpimitan mittaustarkkuutta tarkasteltiin kolmessa osassa. Varsinainen laitteen mittaustarkkuus laskettiin aineistosta, jossa läpimitat mitattiin rinnankorkeudelta (taulukossa 3 rinnank. mitatut). Laitteen mittausrvirheen ja runkokäyrien mallivirheen yhteisvaikutus mittaustarkkuuteen laskettiin aineistosta, jossa läpimittojen mittausta tehtiin rinnankorkeutta ylempää (taulukossa 3 rinnank. yl. mitatut). Nämä kaksi osa-aineistoa yhdistämällä saatiin selville laitteen käytännön mittaustarkkuus, kun läpimitat voitiin mitata myös rinnankorkeudesta eroavalta korkeudelta. Rinnankorkeudelta mitattujen läpimittojen mittaustarkkuuksien keskiarvo oli 130,3 cm. Rinnankorkeutta ylempää mitatut läpimitat mitattiin keskimäärin 309,8 cm:n korkeudelta.

Taulukossa 3 harha on läpimitan poikkeamien keskiarvo ja hajonta näiden poikkeamien keskihajonta. Rinnankorkeudelta mitattujen läpimittojen osa-aineistossa saatiin läpimitalle keskimäärin 0,13 cm:n yliarvio. Hajonta oli 0,82 cm eli 4,7 % keskilämpimitasta (17,5 cm). Tämän aineiston osan tulokset kertovat parhaiten mittausrvirheen läpimitan mittausrvirhevyyttä. Runkokäyrien toiminnasta ja laitteen mittaustarkkuudesta kertovassa osa-aineistossa hajonta oli 1,12 cm. Koko aineistosta laitteella saatiin yliarviota keskimäärin 0,12 cm ja hajonta oli 0,86 cm.

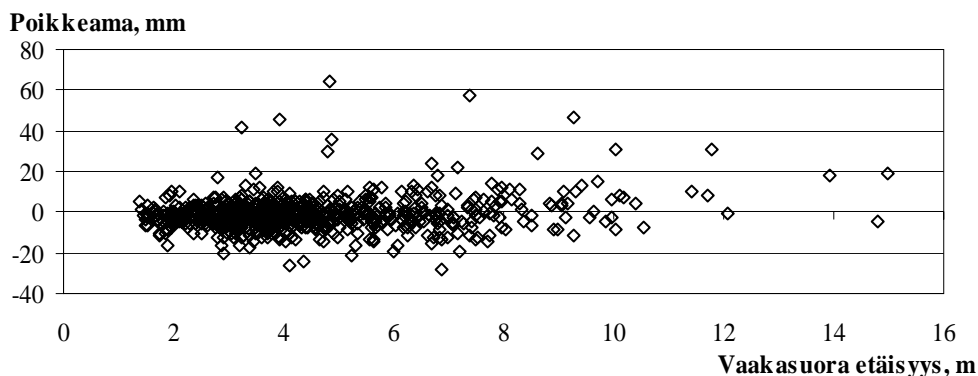
TAULUKKO 3 Rinnankorkeusläpimitan mittaustuloksia

	N, kpl	Harha, cm	%	Hajonta, cm	%
Rinnank. mitatut	717	-0,130	0,7	0,816	4,7
Rinnank. yl. mitatut	108	-0,085	0,4	1,124	5,9
Kaikki	825	-0,124	0,7	0,862	4,9

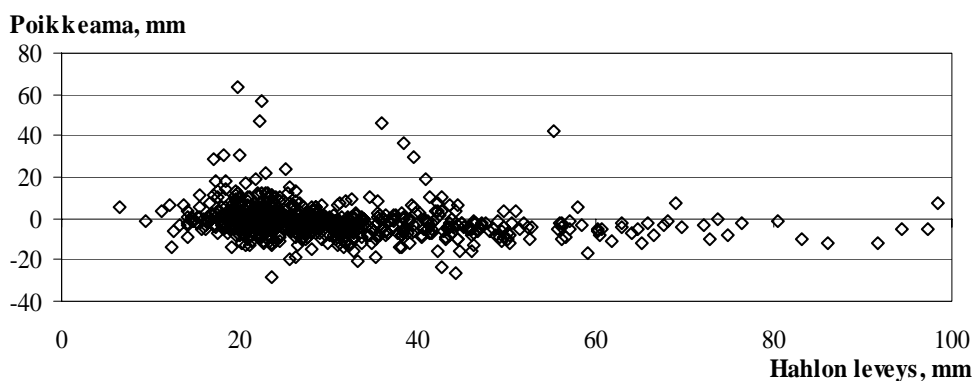
Jatkotarkasteluissa käytetyssä rinnankorkeudelta mitatussa osa-aineistossa läpimitan eroa selittivät mittausrvirheisyys, hahlon leveys, puun mittaukseen kulunut aika ja rinnankorkeusläpimita.

Kuvasta 7 nähdään läpimitan poikkeamat mittausrvirheisyyden (vaakasuora etäisyys) suhteen. Tässä tutkimuksessa kauimmainen puu mitattiin 15 m:n etäisyydeltä. Yli 10 m:n etäisyydeltä läpimita oli mitattu yhteensä vain 13 puusta. Poikkeama ei näyttänyt lisääntyvän merkittävästi mittausrvirheisyyden kasvaessa. Tämä poikkeama teoreettisesta oletuksesta. Poikkeamien, ainakin visuaalisesti tarkasteltuna, heikko riippuvuus sekä mittausrvirheisyydestä että hahlon leveydestä (kuva 8) johtuu siitä, että puiden valintaan käytettiin relaskoopikerrointa 2. Tällöin pienet hahlonleveydet ja toisaalta suuret mittausrvirheisyydet joko puuttuvat aineistosta kokonaan tai ainakin ovat mukana varsin harvalukuisina. Periaatteessa aineistossa ei pitäisi olla yhtään relaskoopikerrointa 2 vastaavaa hahlon leveyttä (20,3 mm) pienempää arvoa (kuva 8). Kuitenkin näitä arvoja on mukana melko runsaasti. Tämä johtuu ainakin pääosin siitä, että läpimitan mittausta varten on jouduttu siirtymään pois

koalan keskipisteestä. Siirtymiseen on ollut syynä joko liian pieni etäisyys puuhun (laserin minimimittausetäisyys) tai esteet koalan keskipisteen ja puun rungon välillä. Kuvissa 7 ja 8 näkyy hyvin poikkeavia havaintoja. Nämä suuret mittausvirheet ovat kaikki läpimitan aliarvioita ja johtuvat etäisyyden mittausvirheistä, kun koalan keskipisteen ja puun rungon välillä on ollut esteitä.



**Kuva 7.** Rinnankorkeuslöpimitan poikkeama mittausetäisyyden suhteen.



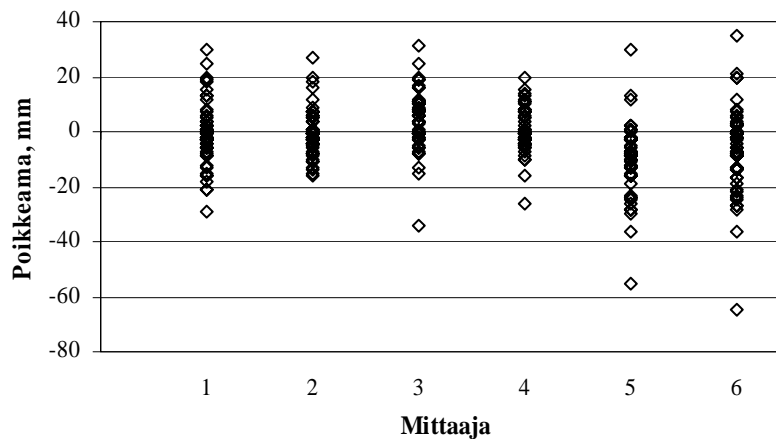
**Kuva 8.** Rinnankorkeuslöpimitan poikkeama hahlon leveyden suhteen.

#### 4.1.2 Hyytiälän koalat

Taulukossa 4 on esitetty rinnankorkeuslöpimitan mittauksen tuloksia Hyytiälän aineistossa. Koko aineistossa löpimitalle saatiin keskimäärin 0,22 cm:n yliarvio. Hajonta oli 1,26 cm eli 4,9 % keskilöpimitasta. Testatun laitteen nykyisellä sekä aikaisemmilla kehitysversioilla mitanneiden henkilöiden (M2, M3 ja M4) tulokset olivat odotetusti parempia kuin laitteella ensi kertaa mitanneiden (M1, M5 ja M6) (taulukko 4 ja kuva 9).

TAULUKKO 4 Rinnankorkeusläpimitan mittaustuloksia. Kaikki mittaajat mittasivat 27 mäntyä, loput olivat kuusia.

	Koko aineisto				
	N, kpl	Harha, cm	%	Hajonta, cm	%
M1	53	-0,066	0,3	1,167	4,6
M2	53	-0,036	0,1	0,874	3,4
M3	53	0,409	1,6	1,072	4,2
M4	53	0,047	0,2	0,804	3,2
M5	52	-1,037	4,1	1,316	5,2
M6	52	-0,660	2,6	1,611	6,3
Kok.	316	-0,220	0,9	1,256	4,9



Kuva 9. Läpimitan mittauksen poikkeamat mittaajittain.

Tutkimuksen mittausetäisyyksillä läpimitan mittaaminen onnistui hyvin. Laitteella saatiin mitattua rinnankorkeusläpimitat lähes harhattomasti. Laserrelaskoopin ensimmäiseen prototyyppiin verrattuna mittaustarkkuuden parannus oli huima. Toisen prototyypin hajonta oli vain noin neljäsosa ensimmäisen prototyypin hajonnasta. Koska vertailumittauksissa on myös virhettä, tulee laserrelaskoopin luotettavuudesta aliarvio. Tämä koskee kaikkia mittaustunnuksia. Kuitenkin mittasaksien läpimitan mittauksen tarkkuuteen on vielä matkaa (esim. Hyppönen & Roiko-Jokela 1978, Päivinen ym. 1992).

Mittaajien välillä oli selviä eroja. Toisaalta kokeneet ja kokemattomat mitaajat erottuivat toisistaan myös selvästi. Koemittaajat kokivat oppivansa laitteen mittausrutiinin helposti. Tulosten valossa oppiminen ei kuitenkaan näytä käyvän aivan käden käänteessä, vaan vaatii tietyn määrän toistoja. Alussa mittaustulokset paranevat mittauskokemuksen kasvaessa. Kun mittausrutiinia on riittävästi, mittaustarkkuus vakiintuu tietylle tasolle.

Rinnankorkeusläpimitan ennustaminen rinnankorkeutta ylempää mitatun läpimitan avulla Laasasenahon (1982) runkokäyrillä aiheutti hajontaan vain noin 0,3 cm:n (1,2 %) lisäyksen. Mahdollisuus mitata läpimita myös rinnankorkeutta ylempää antaa vapauden valita mittauskorkeuden aina tilanteen mukaan. Myös puiden laatutunnusten arviointi käy nykyistä helpommin.

Tiheä ja oksikas puusto vaikeutti läpimitan mittausta huomattavasti. Toisaalta puun kuoren päällä kasvava jäkälä sekä irtonainen kuori vaikeuttivat puun oikean läpimitan havaitsemista mittausetäisyydeltä. Myös mitattavan puun takaa näkyvä toinen puu saattoi tiheään metsän huonoissa valaistusolosuhteissa vaikeuttaa läpimitan mittausta. Läpimitan mittaaminen suurilla kaltevuuskulmilla aiheutti tähtäyslinjan ja laserin korkeuseron vuoksi virheitä etäisyyden mittaukseen.

## 4.2 Suunnan mittauksen tarkkuus

Taulukossa 5 on esitelty suuntakulman mittaustuloksia. Suunnan mittauksessa saatiin koko aineistossa aliarviota keskimäärin 0,3°. Hajonta oli 3,8°. Mittaustarkkuudessa ei ollut eroa mittaajien välillä.

TAULUKKO 5 Suuntakulman mittaustuloksia

	N, kpl	Harha, °	Hajonta, °
M1	53	-0,115	3,265
M2	53	-0,063	2,714
M3	53	0,888	2,102
M4	53	0,292	6,176
M5	52	0,373	3,733
M6	52	0,664	3,647
Kok.	316	0,339	3,813

## 4.3 Etäisyyden mittauksen tarkkuus

Taulukosta 6 näkyy, että koko aineistossa etäisyys mitattiin keskimäärin 6,7 cm liian suureksi. Hajonta oli 13,5 cm. Etäisyyden mittauksessa mittaajien tulokset erosivat toisistaan. Myös kokeneista ja kokemattomista mittaajista muodostettujen ryhmien mittaustuloksien välillä oli eroa.

TAULUKKO 6 Etäisyyden mittaustuloksia

	N, kpl	Harha, m	Hajonta, m
M1	53	-0,113	0,135
M2	53	0,001	0,125
M3	53	-0,092	0,125
M4	53	-0,055	0,105
M5	52	-0,101	0,147
M6	52	-0,041	0,138
Kok.	316	-0,067	0,135

Etäisyysmittausten harha johtuu mittaajan vaikeudesta pysyä tarkalleen koealan keskipisteessä. Mittaajilla näyttää olevan taipumus nojautua taaksepäin mitatessaan, jolloin etäisyydestä tulee liian suuri. Puun tarkan sijainnin mittaamiseksi laitteessa tulisi olla tukijalka, jonka avulla mittauspiste saataisiin vakioiduksi koealan keskipisteeseen.

#### 4.4 Pituuden mittauksen tarkkuus

Koko aineistossa pituuden mittaus oli lähes harhatonta (taulukko 7). Hajonta oli keskimäärin 49 cm, joka oli 2,2 % mitattujen puiden pituuksien keskiarvosta. Pituuden mittauksessa ei ollut eroa mittaajien välillä. Mittausten hajonta vaihteli mittaajien välillä melko paljon. Mittaajan 6 pituuden mittauksen hajonta oli vain noin 17 cm, kun se oli mittaajalla 5 noin 77 cm.

TAULUKKO 7 Pituuden mittaustuloksia

	N, kpl	Harha, m	%	Hajonta, m	%
M1	9	-0,392	1,8	0,513	2,3
M2	10	0,021	0,1	0,248	1,1
M3	10	0,051	0,2	0,529	2,4
M4	10	-0,012	0,1	0,315	1,4
M5	10	0,260	1,2	0,769	3,5
M6	10	0,126	0,6	0,173	0,8
Kok.	59	0,016	0,1	0,490	2,2

Pituuden mittaus oli toimiva. Kun näkyvyys oli hyvä, pituus oli vaivaton ja nopea mitata. Pituuden mittaus laserrelaskoopilla on tehokasta, koska etäisyyttä mitattavasta puusta ei tarvitse erikseen mitata kuten hypsometrillä. Mittaajien pituuden mittausrvirheiden keskimääräinen hajonta oli pienempää kuin useimmissa Suunto-hypsometrillä mittaustarkkuutta tarkastelevissa tutkimuksissa (esim. Hyppönen & Roiko-Jokela 1978, Päivinen ym. 1992). Puun pituuden mittausta hankaloitti laitteen II prototyypin kaltevuuskulmamittarin  $\pm 45$  asteen kulmarajoitus. Kulmarajoitus pakotti mittaajan siirtymään pituuden mittausta varten puun pituuden etäisyydelle puusta. Tiheässä metsässä puun tyven, rungon ja latvan näkyminen sekä laserin kohdistaminen puun runkoon samasta pisteestä puun pituuden etäisyydeltä oli joskus toivotonta. Tiheässä puustossa laitteen III prototyypin kaltevuuskulmamittarin vaihteluvälin laajennus olisi varmasti helpottanut ja nopeuttanut puiden mittausta merkittävästi.

#### 4.5 Tilavuusennusteen tarkkuus

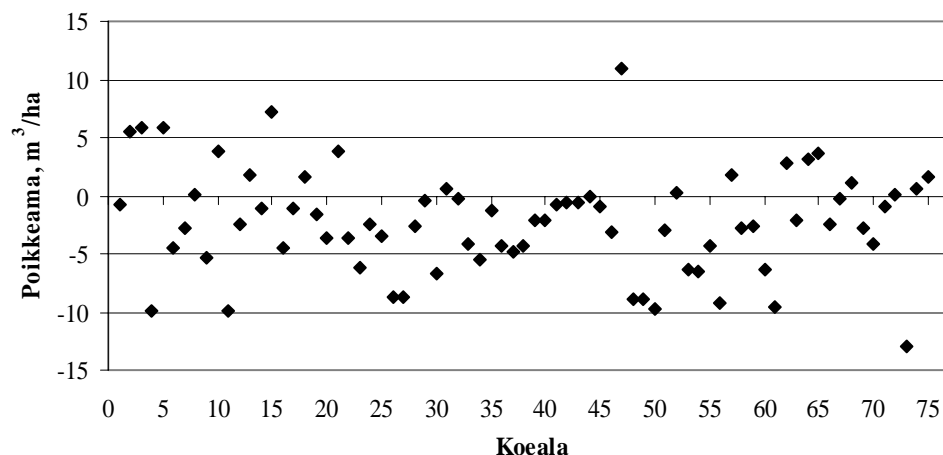
Taulukossa 8 ja kuvassa 10 on verrattu koealoille laskettuja tilavuuksia oikeina pidettyihin vertailuaineiston tilavuuksiin UPM-Kymmenen koealoilla. Laserrelaskoopilla saatiin keskimäärin 2,2 m<sup>3</sup>/ha liian suuria tilavuusestimatteja. Hajonta oli 4,5 m<sup>3</sup>/ha eli 2,8 % keskitilavuudesta (158 m<sup>3</sup>/ha).

TAULUKKO 8 Tilavuusennusteen tarkkuus koko aineistossa

	N, kpl	Harha, m <sup>3</sup> /ha	%	Hajonta, m <sup>3</sup> /ha	%
Laserrelaskooppi	75	-2,2	1,4	4,5	2,8

Tilavuuden poikkeama riippui eniten koealan pohjapinta-alasta sekä yksittäisen puun mittaukseen käytetystä ajasta.





**Kuva 10.** Laserrelaskoopilla mitatuista puista laskettujen koealatilavuuksien poikkeamat koealoittain. Koealat ovat mittauspäivän mukaan aikajärjestyksessä.

## 4.6 Ajanmenekki

Koko UPM-Kymmenen aineistossa koealan mittaukseen kului keskimäärin aikaa laserrelaskooppimenetelmällä 15,5 min. Laserrelaskoopilla yhden puun mittaamiseen kului keskimäärin 85 s. Puittainen mittausaika vaihteli 33 sekunnista 169 sekuntiin. Niiden koealojen osalta, joilta oli aikatieta myös vertailumittauksista, ajat olivat laserrelaskooppimenetelmällä 25,4 min ja vertailumenetelmällä, kahden mittaajan mittausryhmän tekemänä 26,3 min.

Hyttiälän aineistossa koealan mittaukseen kului aikaa 16,8 min, kun aika laskettiin kaikkien mittaajien keskiarvona. Yhden puun mittaamiseen laserrelaskoopilla kului aikaa keskimäärin 75 sekuntia. Yhden puun mittausaika vaihteli 55 sekunnista 99 sekuntiin.

Tutkimuksessa tarkastellun mittauslaitteen II prototyypin kaltevuuskulmaanturin 45 asteen rajoite hidasti mittauksia. III prototyypin kaltevuuskulmattarin parannukset tulevat nopeuttamaan mittauksia. Kuitenkin jo testatun prototyypin aikatutkimuksista saadaan viitteitä siitä, mihin laite lopulta pysyy. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan jo sanoa, että mittaus laserrelaskoopilla on kohtuullisen nopeaa perinteisiin mittausmenetelmiin verrattuna. Kun laserrelaskooppimittausten ajanmenekkiä tarkastellaan tämän tutkimuksen vertailuaineistoon tai muihin tutkimuksiin, on syytä korostaa mittaajien määrän merkitystä. Yksi henkilö, joka mittasi laserrelaskoopilla, käytti koealan mittaukseen keskimäärin suunnilleen saman verran aikaa kuin vertailuaineiston kaksi mittaajaa, jotka käyttivät perinteisiä mittavälineitä samojen tunnusten mittaamiseen.

## 4.7 Laitteen käytettävyys

Laitteen käytettävyys oli parantunut huomattavasti ensimmäisen kehitysversio-  
n ajoista. Ensimmäisellä prototyyppillä mittaaja jaksoi vaivoin mitata läpi  
kerralla silloisen parikymmentä puuta käsittäneen mittausradan. Tässä tut-  
kimuksessa tarkastellulla toisella kehitysversiolla pystyi jo kokopäiväiseen  
mittaukseen. Pitkän mittauspäivän viimeisillä hetkillä mittaaja kyllä tunsi  
väsymystä sekä selässään, käsissään että silmissään. Selkä- ja käsivaivat  
johtuivat laitteen painosta (2,6 kg). Silmien väsyminen oli puolestaan seura-  
usta puiden kylkien tuijottamisesta hyvinkin vaihtelevissa valaistusolosuh-  
teissa.

Mittausasento on hyvin samanlainen kuin kiväärillä ammuttaessa. Tällöin  
ammuntakokemuksesta ja yleensä käsien vakaudesta on hyötyä mittauksis-  
sa. Laitteen paino teki päivän mittaan kuitenkin tehtävänsä ja epävakaus  
lisääntyi iltaa kohden. Kokopäiväistä, ammattimaista mittausta ajatellen lai-  
tetta on kevennettävä ja painopistettä siirrettävä lähemmäs mittaajaa. Lisäksi  
maahan tuettava mittaustuki voisi tulla kyseeseen tilanteissa, joissa vaadi-  
taan erityistä mittaustarkkuutta.

## 5 PÄÄTELMIÄ JA KEHITYSSUUNTIA

Laserrelaskooppi perustuu vanhaan relaskooppiperiaatteeseen. Tästä lähtö-  
kohdasta on kehitetty nykYTEKNOLOGIAA hyödyntävä sovellus, joka saattaa  
muuttaa merkittävästi koko metsänmittauskäytännön. Käyttäessään laserre-  
laskooppia metsänmittaaja saa mittaamastaan kohteesta entistä tarkempaa  
tietoa. Myös tiedon luotettavuutta on mahdollista arvioida, kun tiedetään  
mittaajan eri puutunnusten mittaustarkkuus. Puiden läpimittojen mittauk-  
sessa ei tarvitse enää olla sitoutunut rinnankorkeuteen, sillä laitteeseen voi-  
daan ohjelmoida puiden runkomuotoa kuvaavat mallit, joilla rinnankor-  
keusläpimitta voidaan ennustaa luotettavasti. Lisäksi laitteeseen voidaan si-  
sällyttää myös muuta esilaskentaa. Laserrelaskoopilla voidaan mm. ennus-  
taa koealan ja kuvion runkolukusarja, puuston tilavuus ja tukkiosuus jo  
metsässä ilman jakaumamalleja. Tarkka koealojen paikannus tuo uusia  
mahdollisuuksia ilma- ja satelliittikuvien hyödyntämiseen metsäalueen  
puuston arvioinnissa. Puuston spatiaalisen rakenteen tunteminen on arvo-  
kasta mm. metsikön harvennustarpeen tarkastelussa. Lisäksi, kun tilajärjes-  
tys tunnetaan, voidaan inventointimenetelmä valita jatkossa optimaalisesti.  
Laitteen mittausohjelma on muutettavissa vastaamaan inventoinnin tarpeita  
tapauskohtaisesti.

Tutkimuksessa mitatut koealat olivat relaskooppikoealoja. Koealoilla puut  
valittiin laitteen tähtäinlevyyden piirretyllä relaskooppikerrointa 2 vastaavalla  
hahlolla. Hahlo oli mataluutensa vuoksi vaikea käyttää. Jos hahlo olisi taas  
ollut korkeampi, se olisi haitannut puiden näkyvyyttä läpimitan mittaukses-  
sa. Koska metsän inventoinnissa tärkein tehtävä on määrittää puuston arvo,  
puiden valinta koealalla on järkevintä edelleen tehdä relaskooppiperiaatteen

mukaan. Tällöin puuston suuret, arvokkaimmat puut saavat pääpainon pienten arvoltaan vähäisten puiden jäädessä vähemmälle. Lisätutkimusta kuitenkin tarvitaan koealatyypin ja puiden tarkoituksenmukaisessa valinnassa sekä valinnan teknisessä toteutuksessa. Jatkossa pituuskoepuiden otantatapa sekä -tiheys (joka n:s puu tai kumuloituva pohjapinta-ala) pitää olla muutettavissa mittausohjelman parametrien avulla.

Viikissä 15.5.2003 pidetyssä hankkeen loppuseminaarissa metsäorganisaatioiden edustajat pääsivät kokeilemaan ja arvioimaan kehitettyä mittauslaitetta. Käytännön metsäsuunnittelutyöhön laite nähtiin vielä liian hitaaksi, mutta tutkimukseen se jo soveltuu. Laserrelaskoopin laajempi käyttö metsäsuunnittelun kuviotiedon keruussa vaatisi koko metsäsuunnittelun inventointimallin uudistamista. Ajatuksena laitteen käytössä olisi mitata aiempaa tarkemmin, mutta määrällisesti vähemmän. Kuvatulkintamenetelmien kehityessä laitteella nähtiin olevan tulevaisuutta paikkaan sidotun maastoaineiston mittauksessa. Kiinnostusta herätti mahdollisuus siirtyä yksinpuinmittaukseen alueilla, erityisesti Pohjois-Suomen erirakenteisissa metsiköissä, joilla nykyiset mallit eivät anna luotettavia tuloksia. Myös ajatus läpimitan mittauksen irtautumisesta rinnankorkeudelta houkutteli. Tilausta erilaisille mittaukselle helpottaville elektronisille laitteille on olemassa. Esimerkkinä tästä mainittiin elektroninen relaskoopilaskin.

Laite ideoitiin jatkossa varustettavan digitaalikameralla. Mittauksen hitain vaihe, läpimitan mittaus nopeutuisi mekaanisen hahlomekanismin korvautuessa digitaalitekniikalla. Tällöin läpimitan mittaus tapahtuisi esim. kosketusnäytöltä merkitsemällä puun kyljet. Toinen kehittyneempi tapa voisi perustua automaattiseen hahmontunnistukseen. Automaattisen hahmontunnistuksen kiistattomana etuna olisi mittauksen tarkkuuden riippumattomuus mittaajasta. Mittausjalustalla voitaisiin edelleen parantaa mittaustarkkuutta ja samalla mittaukset saataisiin sidottua tarkemmin koealan keskipisteeseen. Mahdollisia uusia mittaustunnuksia voisivat olla mittaussektori (osakoeala), koealan edustavuussäde sekä läpimitat latvus- ja laaturajalta. Tulosten laskeutumiseen tulisi lisätä runkokäyrät. Tällöin vapaasti valitulta korkeudelta mitatun läpimitan avulla voitaisiin ennustaa luotettavasti rinnankorkeusläpimitta.

## KIRJALLISUUS

- Hyppönen, M. & Roiko-Jokela, P.** 1978. Koepuiden mittauksen tarkkuus ja tehokkuus. *Folia Forestalia* 356.
- Kalliovirta, J.** 2003. Laserrelaskoopin tarkkuus ja tehokkuus. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Laasasenaho, J.** 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 108.
- Parker, R C. & Matney, T. G.** 1999. Comparison of optical dendrometers for prediction of standing tree volume. *Southern Journal of Applied Forestry* 23(2): 100–107.
- Päivinen, R., Nousiainen, M. & Korhonen, K. T.** 1992. Puutunnusten mittaamisen luotettavuus. *Folia Forestalia* 787.
- Räty, M.** 2001. Laserrelaskoopin virheanalyysi. Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto.
- Skovgaard, J. P., Johannsen, V. K. & Vanclay, J. K.** 1998. Accuracy and precision of two dendrometers. *Forestry* 71(2): 131–139.
- Uurtamo, A.** 2002. Laserrelaskooppi. Rovaniemen ammattikorkeakoulun sähkötekniikan koulutusohjelman opinnäytetyö. Rovaniemi

**MASSER-LASERRELASKOOPIN TEKNISET TIEDOT  
VALMISTAJAN ILMOITUKSEN MUKAAN**

Paino	2 000 g (akku mukana)	
Käyttölämpötila	-10° C - +40° C	
Säilytyslämpötila	-20° C - +70° C	
Kosteussuojaus	Vesitiivis IP 67	
Näppäimistö	Enter-näppäin, valintakytkin ja alfanumeerinen näppäimistö	
Näyttö	128 x 64 pikselin graafinen LCD, taustavalo	
Tiedonsiirto	Sarjaportti RS 232C	
Muistikapasiteetti	8 000 puuta	
Virtalähde	Ladattava akku + varmistusparisto	
Työskentelyaika	10 – 15 tuntia	
Takuu	1 vuosi	
Mittausominaisuudet		
	Mittausalue	Mittautarkkuus
Etäisyys	1 – 30 m	1 mm
Suunta	0 – 360°	0,01°
Puun korkeus	0 – (50) m	1 cm
Läpimitta	1 – 100 cm	1 mm

**Lisätiedot:** Savcor Forest Oy  
Insinöörinkatu 8  
50100 Mikkeli

[www.savcor.com](http://www.savcor.com)  
tai [www.savcor.com/divisions/forest/main.asp](http://www.savcor.com/divisions/forest/main.asp)