

HAVUMETSÄN LATVUSPEITON MITTAAMINEN JA ENNUSTAMINEN PUUSTOTUNNUKSISTA

Lauri Korhonen

METSÄSUUNNITTELUN JA -EKONOMIAN
PRO GRADU

TIIVISTELMÄ

Latvuspeitolla eli latvuspeittävyydellä (engl. canopy cover) tarkoitetaan prosenttiosuutta, jonka latvuston pystysuora projektiio peittää maan pinnasta. Latvuspeitto poikkeaa ns. latvussulkeumasta (engl. canopy closure), joka määritellään prosenttiosuutena, jonka latvusto peittää taivaanpallosta yksittäisestä pisteestä havaittuna. Latvuspeiton mittauksessa latvuksen sisäisiä aukkoja ei yleensä huomioida, vaan latvusto nähdään yhtenäisenä; jos sisäiset aukot huomioidaan, kyseessä on ns. vaikuttava latvuspeitto (engl. effective canopy cover).

Kiinnostus latvuspeiton mittaamiseen on kasvanut latvuspeittoa hyödyntävien sovellusten lisääntyttyä. Myös kansainvälinen metsän määritelmä perustuu latvuspeittoon. Latvuspeiton mittaamiseen ei kuitenkaan ole löydetty nopeaa ja tarkkaa menetelmää. Tämän tutkimuksen tavoitteena oli laatia latvuspeiton ennustamiseen puustotunnuksista perustuvia regressiomalleja ja tutkia niiden toimivuutta erilaisiin maanpäällisiin latvuspeiton mittausmenetelmiin verrattuna. Aineistoksi mitattiin Suonenjoen lähistöltä 65 havupuuvältaista koealaa, joiden latvuspeitto määritettiin Cajanuksen putkella. Näistä 19 koealaa mitattiin latvuspeiton mittausmenetelmien vertailukoealoina, joilta latvuspeitto määritettiin käyttäen myös LIS- eli mittanauhamenetelmää, densiometriä, latvuksiltaan mustattuja ja mustaamattomia digikuvia, mittaajan ja kahden VMI-ryhmänjohtajan suorittamaa silmävaraista arviointia sekä jälkikäteen riippumattomaan aineistoon sovitettuja regressiomalleja. Menetelmien vertailu tehtiin käyttäen epäparametrista Kruskal-Wallis -varianssianalyysiä ja monivertailuja.

Puustotunnuksista parhaiten latvuspeiton kanssa korreloi pohjapinta-ala, joka ei kuitenkaan yksinään riittänyt tyydyttäviin tuloksiin (mänty $R^2 = 0,474$ ja $s_e = 0,121$, kuusi $R^2 = 0,438$ ja $s_e = 0,125$). Kun lisäselittäjäksi otettiin läpimitta tai kuusella pituus, tulokset paranivat huomattavasti (mänty $R^2 = 0,903$ ja $s_e = 0,0530$, kuusi $R^2 = 0,741$ ja $s_e = 0,0864$). Mallien selitysastetta ja keskivirhettä saatiin edelleen parannettua, kun selittäjiksi lisättiin runkoluku ja kuuselle myös lehtipuiden osuus (mänty $R^2 = 0,928$ ja $s_e = 0,0480$, kuusi $R^2 = 0,844$ ja $s_e = 0,0742$).

Eri menetelmien vertailussa tilastollisesti merkitsevästi kontrollimenetelmästä (Cajanuksen putki) poikkesivat ryhmänjohtajien silmävaraiset arviot, mustaamattomat digikuvat ja subjektiivinen kymmenen pisteen densiometrimittaus, jotka aliarvioivat latvuspeittoa. Yksikään menetelmä ei merkittävästi yliarvioinut latvuspeittoa. Lähimpänä kontrollimittausta oli LIS-menetelmä, regressiomallit olivat tarkkuudeltaan keskimääräisiä. Tulosten perusteella latvuspeiton mittaamiseen kannattaa käyttää joko Cajanuksen putkea tai LIS-menetelmää, jos käytettävissä on riittävästi aikaa ja halutaan tarkkoja tuloksia. Jos arviointi on tehtävä nopeasti, voidaan käyttää regressiomalleja tai silmävaraista arviointia, joka kuitenkin vaatii arvioijien hyvän koulutuksen. Nopeaa ja tarkkaa latvuspeiton arviointimenetelmää ei siis tässäkään työssä kiistattomasti löytynyt. Tulevaisuudessa latvuspeiton mittaus siirtynee kaukokartoituksen avulla tehtäväksi tarkkojen kaukokartoitusmenetelmien kustannusten laskiessa.

Avainsanat: latvustot, latvuspeitto, latvussulkeuma, Cajanuksen putki, LIS, densiometri, digikamera, regressiomallit, Kruskal-Wallis -varianssianalyysi

ALKUSANAT

Tutustumiseni latvuspeittotutkimukseen alkoi kesällä 2004 työskennellessäni Joensuun Metlalla työnkuvanani puusto- ja latvusmittausten tekeminen. Myöhemmin opinnäytetyön aihetta miettiessäni päädyin jatkamaan jo tutuksi tulleen aihepiirin parissa. Alun perin tarkoituksena oli tutkia erilaisia latvuspeiton mittaussmenetelmiä ja latvuspeiton silmävaraisen arvioinnin luotettavuutta valtakunnan metsien inventointia varten, kunnes ilmeni että myös Helsingin yliopiston metsäekologian laitoksella oli tarvetta latvuspeittoon, ja erityisesti latvuspeiton regressiomallinnusta käsittelevän opinnäytetyön laatijalle. Niinpä talven 2004-2005 aikana opinnäytetyöni muodostui VMI:n ja HY:n metsäekologian laitoksella toimivan "LAI Detectives' Group" -ryhmän yhteisprojektiksi, jossa tavoitteena oli tutkia sekä regressiomallien että erilaisten mittavälineiden ja -menetelmien toimivuutta latvuspeiton estimoinnissa. Maastotyöt tehtiin kesällä 2005, ja aineiston analyysi kuten myös tutkielman kirjoitustyö valmistuivat seuraavan syksyn aikana. Toivon että työ täyttää sille asetetut tavoitteet.

Työni alkuunsaannista ja ohjauksesta vastasivat pääosin MMT Kari T. Korhonen metsäntutkimuslaitoksen Joensuun toimipisteestä ja MMT, FM Pauline Stenberg Helsingin yliopiston metsäekologian laitokselta. Työtäni ovat osaltaan ohjanneet ja kommentoineet myös Joensuun yliopiston metsänarvioimistieteen professori Matti Maltamo ja MMT Miina Rautiainen. Maastotyöstä ei olisi tullut mitään ilman Pekka Voipion korvaamatonta panosta, ja myös muut Suonenjoen ja Joensuun metlalaiset sekä kanssani aineistoa omaan graduunsa kerännyt Sanna Ervasti auttoivat minua aina kun apua tarvitsin. YTL Esko Valtosen neuvot varianssianalyysin laatimisessa olivat myös arvokkaita. Haluan kiittää teitä kaikkia työni eteen näkemästänne vaivasta.

Joensuussa 18.1 2006

Lauri Korhonen

SISÄLLYS

1. JOHDANTO.....	7
1.1 Työn tausta.....	7
1.2 Latvuspeiton määritelmä	9
1.3 Työn tavoite	11
2. LATVUSPEITON ARVIOINNIN MENETELMÄT	12
2.1 Harhattomat menetelmät	12
2.1.1 Cajanuksen putki	12
2.1.2 Mittanauhamenetelmä eli LIS	15
2.1.3 Latvusrelaskooppi.....	15
2.2 Avauskulmalliset mittavälineet ja -menetelmät	16
2.2.1 Avauskulman vaikutus latvuspeiton mittauksessa	16
2.2.2 Kamera	17
2.2.3 Densiometri	19
2.2.4 Hirvitorvi	20
2.2.5 LAI-2000	21
2.3 Silmävarainen arviointi	22
2.4 Latvuspeiton tilastollinen mallinnus puustotunnuksista	23
2.5 Latvuspeiton estimointi kaukokartoitusaineistoista	24
2.6 Mittaajan vaikutus eri menetelmiin	26
3. AINEISTO JA KÄYTETYT MENETELMÄT	27
3.1 Mittausasetelma	27
3.1.1 Latvuspeiton perusmittaus.....	27
3.1.2 Muut latvuspeiton mittausmenetelmät	28
3.1.3 Puustotunnusten mittaus	31
3.2 Aineisto ja sen käsittely	33
3.2.1 Maastotyö	33
3.2.2 Koealatunnusten laskenta	34
3.2.3 Aineiston yleiskuva	34
3.3 Tilastolliset menetelmät	37
3.3.1 Mallinnus	37
3.3.2 Eri menetelmien vertailu	37
4. TULOKSET	42
4.1 Latvuspeiton tilastollinen mallinnus	42
4.1.1 Latvuspeiton riippuvuus eri selittäjistä	42
4.1.2 Yhden selittäjän mallit.....	45
4.1.3 Kahden selittäjän mallit.....	46
4.1.4 Useamman selittäjän mallit.....	48
4.1.5 Menetelmien vertailua varten laaditut mallit.....	50
4.2 Latvuspeiton mittausmenetelmien vertailu.....	52
4.2.1 Eri menetelmien väliset erot	52
4.2.2 Cajanuksen putki ja LIS-menetelmä	55
4.2.3 Densiometri	55
4.2.4 Digikuvat.....	57
4.2.5 Silmävarainen arviointi	57
4.2.6 Mallit	58

4.2.7 Menetelmien käytännöllisyys	60
5. TULOSTEN TARKASTELU	63
6. KIRJALLISUUS	67

Liite 1. Tutkimuksessa käytettyjä lyhenteitä ja termejä

Liite 2. Cajanuksen putki -mittapisteiden sijoittuminen koealalle

1. JOHDANTO

1.1 Työn tausta

Metsikön latvuspeitto tai latvuspeittävyys on eräs metsänarvioinnissa viime aikoina eniten esillä olleista tutkimusaiheista. Lyhyesti määriteltynä latvuspeitolla tarkoitetaan sitä prosenttiosuutta, jonka puiden latvustot peittävät maanpinnasta (luku 1.2). Latvuspeitto sinänsä ei ole lainkaan uusi metsästä mitattava tunnus, mutta aiemmin sen määrittämistä ei pidetty kovinkaan tärkeänä; ovathan metsätieteellisen tutkimuksen ja metsänarvioinnin päätavoitteet perinteisesti liittyneet puuntuotannon ja puun teollisen käytön turvaamiseen. Viime aikoina on kuitenkin noussut esiin useita syitä, jotka ovat lisänneet kiinnostusta latvuspeiton mittaamiseen.

Riossa vuonna 1992 järjestetty YK:n ympäristö- ja kehityskonferenssi toi yleiseen tietoisuuteen metsien monimuotoisuuden merkityksen koko planeetan ekologiselle tasapainolle, minkä jälkeen metsäekologiaan kohdistuva kiinnostus on lisääntynyt jatkuvasti. Uuden monitavoitteisen metsätalouden myötä myös metsänarvioinnissa on syntynyt tarve kehittää sellaisia suureita ja inventointimenetelmiä, joiden avulla usein hankalasti mitattavia metsän ekologisia arvoja voidaan tutkia. Latvuspeiton on osoitettu toimivan käyttökelpoisena indikaattorina mm. metsän säteilyolojen ja mikroilmaston arvioinnissa sekä samalla myös monien eläin- ja kasvilajien habitaattien tunnistamisessa (Lowman & Rinker 2004). Lisäksi latvuspeittotietoa tarvitaan usein pohjatiedoksi johdettaessa erilaisia erikoistuneempia ekologisia suureita; esimerkiksi lehtialaindeksi eli LAI (engl. Leaf Area Index) (esim. Lowman & Rinker 2004) on esimerkki metsän kasvua ja terveydentilaa kuvaavasta indeksistä, jota mitattaessa latvuspeiton tuntemisesta on hyötyä. Suoria metsätaloudellisia syitä latvuspeiton tutkimiselle ovat mm. latvuspeiton merkitys metsän uudistumiselle soveliaitten olosuhteiden aikaansaamisessa (Buckley ym. 1999) sekä harvennusten ja lannoitusten vaikuttavuuden kasvu- ja tuotosopillinen arviointi latvuspeiton avulla (Johansson 1984).

Pakottavin syy mitata latvuspeittoa on YK:n maatalous- ja elintarvikejärjestön eli FAO:n virallinen latvuspeittoon perustuva metsän määritelmä, jota käytetään kansainvälisessä metsätilastoinnissa. Määritelmän mukaan *”Metsää ovat sellaiset vähintään 0,5 hehtaarin suuruiset alueet, joilla puuston latvuspeittävyys on yli 10 % ja puusto pystyy saavuttamaan vähintään 5 metrin pituuden”* (FAO 2000). Vastaavasti ”muuta puustoista alaa” ovat alueet, joilla latvuspeitto on 5-10 % ja puusto voi saavuttaa yli viiden metrin pituuden, tai alueet joilla latvuspeitto on yli 10 % mutta puuston pituus ei ylitä viittä metriä. Tästä syystä kansainvälisen vertailukelpoisuuden varmistamiseksi metsäninventoinneissa, kuten Suomen valtakunnan metsien inventoinnissa (VMI), on tarpeen määrittää myös koealakohtainen latvuspeitto.

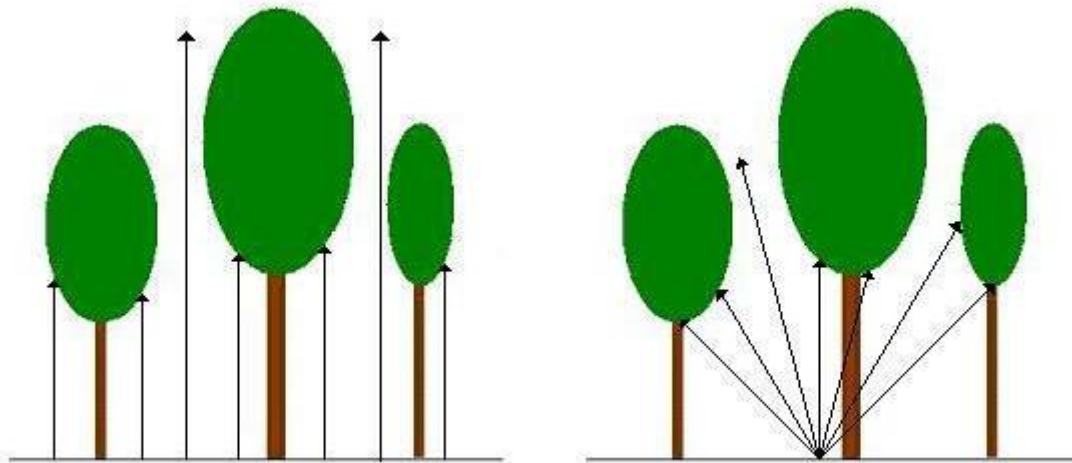
Kaukokartoituksen käytön voimakas yleistyminen metsäninventoinnissa on myös lisännyt latvuspeittotiedon tarvetta, sillä koealan latvuspeiton (esim. Gemmell 1999) tai yksittäisen puun latvusalan (esim. Culvenor 2003) estimointia tarvitaan kaukokartoitusanalyysissä puuston erottamiseksi aluskasvillisuudesta, oltiinpa kiinnostuneita sitten fysikaalisten heijastusmallien soveltamisesta (esim. Kuusk & Nilson 2000) tai puuston tilavuuden estimoinnista (esim. Maltamo ym. 2004). Tuki- tai vertailuaineistoksi tarvitaan usein myös maanpäällisin mittauksin varmistettua latvuspeittoaineistoa (esim. Strandström 1999). Latvuspeittotiedosta on siis hyötyä tulosten luotettavuuden varmistamisessa ja uusien kaukokartoitusmenetelmien kehittämisessä.

Vaikka ulkomailla latvuspeiton määrittämistä on tutkittu paljonkin, Suomessa vastaavia tutkimuksia ei ole tehty, eivätkä esim. Amerikassa saadut tulokset välttämättä sovellu Suomen olosuhteisiin. Lisäksi perinteiset latvuspeiton mittausmenetelmät ovat varsin työläitä ja runsaasti kallista maastotyötä vaativia; vastaavasti jos maastotyön määrästä tingitään, tulokset ovat yleensä liian epätarkkoja (luku 2). Tarve nopean, tarkan ja Suomen olosuhteisiin soveltuvan latvuspeiton arviointimenetelmän löytämiseksi on siis suuri. Tästä syystä latvuspeiton arvioinnin menetelmien tutkimus onkin eräs tämänhetkisen metsänarvioimistieteen keskeisimpiä aiheita.

1.2 Latvuspeiton määritelmä

Latvuspeitto tai *latvuspeittävyys* (engl. canopy cover) määritellään täsmällisesti prosenttiosuutena, jonka metsän puiden latvuston pystysuora projektiio peittää maan pinnasta (Jennings ym. 1999). Latvuspeittoa määritettäessä mittaus on siis tehtävä täsmälleen pystysuorassa suunnassa, ja latvuspeitto lasketaan prosenttiosuutena jakamalla latvusten peittämä pinta-ala tarkasteltavan alueen pinta-alalla. Tämä määritelmä on yhdenmukainen ekologiassa käytetyn latvuspeiton määritelmän kanssa (Jennings ym. 1999).

Latvuspeitto on tärkeää erottaa ns. *latvussulkeumasta* (engl. canopy closure), joka tarkoittaa sitä prosenttiosuutta, jonka latvusto peittää taivaanpallosta yksittäisestä pisteestä havaittuna (kuva 1) (Jennings ym. 1999). Suomeksi voidaan myös käyttää termejä latvuston sulkeuma tai pelkästään sulkeuma; englannin kielessä on myös käytetty termiä "angular canopy cover" ja sulkeuman vaikutusta metsän valaistusolosuhteisiin korostavaa muotoa "canopy light interception" (Nuttle 1997). Sellaiset menetelmät, joissa yhdestä paikasta havainnoidaan pistettä laajempaa aluetta latvustosta, mittaavat siis määritelmän mukaisesti latvuston sulkeumaa eivätkä pystysuoran projektion osuutta eli latvuspeittoa. Niinpä esimerkiksi kameralla ylöspäin otetuista valokuvista ei voida harhattomasti estimoida latvuspeittoa, koska kuvan laidoilla latvukset "kaatuvat" kuvan keskustaan päin, jolloin latvuspeittoestimaatista tulee yliarvio. On myös huomattava, että latvuspeittoa mitattaessa puuston pituudella ja latvusrajalla ei ole merkitystä lopputuloksen kannalta. Sen sijaan latvussulkeumaa on sitä suurempi, mitä pidempiä puut ovat ja mitä alempi on niiden latvusraja; pitkät puut peittävät taivaankantta enemmän kuin lyhyet, kuten myös puut joiden latvusraja on alhainen (Jennings ym. 1999).



Kuva 1. Esimerkki latvuspeiton (vasemmalla) ja latvussulkeuman (oikealla) mittaamisesta. Koealan sulkeuma-arvio on latvuspeittoa suurempi.

Saatu yliarvio on sitä suurempi, mitä laajemmalla avauskulmalla (engl. angle of view) latvustoa mitataan (Bonnor 1967, Bunnell & Vales 1990, Cook ym. 1995, Nuttle 1997). Avauskulmalla tarkoitetaan tässä työssä sitä kulmaa, joka kertoo kuinka suurta taivaankannen osaa mitataan. Toisinaan puhutaan myös kulmasta, joka kertoo kuinka kaukaa pystysuoraan linjaan nähden laite enimmillään mittaa (esim. Bonnor 1967); tällöin avauskulma on ilmoitettu kulma kerrottuna kahdella.

Latvuspeittoa ja -sulkeumaa käsittelevissä julkaisuissa esiintyy jatkuvasti epäselvyyttä siitä, mitä milloinkin on mitattu tai millä nimellä mitattuun tunnukseseen pitäisi viitata (mm. Sarvas 1954, Johansson 1984, Kuusipalo 1985, Bunnell & Vales 1990, Ganey & Block 1994, Cook ym. 1995, Nuttle 1997). Tässä työssä käytetyt määritelmät julkaisivat Jennings ym. (1999), ja uudemmissa englanninkielisissä julkaisuissa käytetty käsitteistö on yleensä ollut näiden määritelmien mukainen. Tosin edes englanninkielinen käsitteistö ei ole vielä täysin vakiintunut, ja tätä työtä varten monet termit on käännetty suomeksi ensimmäistä kertaa (liite 1). Toivottavaa kuitenkin olisi, että jatkossa latvuspeittoon ja -sulkeumaan viitattaisiin yhdenmukaisesti samoin käsittein.

Latvuspeittoa määriteltäessä on myös erotettava toisistaan ”*perinteinen*” ja ns. ”*vaikuttava latvuspeitto*” (engl. ”effective canopy cover”) (Rautiainen ym. 2005). Vaikuttava latvuspeitto eroaa perinteisesti määritellystä latvuspeitosta siinä, että se huomioi myös latvuksen sisäiset aukot. Sen sijaan perinteisestä latvuspeitosta puhuttaessa oletetaan, että latvuksella on olemassa tietty ”ulkoraja”, jonka

sisäpuolinen osa on latvusta riippumatta siitä onko rajan sisäpuolella aukkoja vai ei. Perinteisen latvuspeiton ongelma on se, ettei tällaista selvää rajaa aina löydy, vaan se mutkittelee yksittäisten pitkien oksien mukaisesti. Toisaalta vaikuttavan latvuspeiton mittaaminen on usein hankalaa, vaikka myös perinteisillä menetelmillä voidaan tarvittaessa erotella sellaiset kohdat, joissa yksittäisten latvusten sisällä esiintyy aukkoja (Johansson 1984). Niinpä tässä työssä tarkastellaan lähinnä perinteistä latvuspeittoa. Vaikuttavan latvuspeiton käsitteellä on merkitystä lähinnä metsien valaistusoloihin liittyvissä tutkimuksissa, ja niissäkin on luontevampaa puhua suoraan latvussulkeumasta tai säteilyolojen mittauksesta. Latvussulkeumaa määritettäessä latvusten sisäiset aukot yleensä huomioidaan, jotta säteilyoloista saadaan realistinen kuva.

1.3 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on testata ja vertailla puustotunnuksiin perustuvien regressiomallien ja erilaisten maastomittausmenetelmien toimivuutta latvuspeittotiedon tuottamisessa. Työssä laaditaan mahdollisimman hyvä alueellinen tilastollinen malli, jolla latvuspeittoa voidaan estimoida perinteisten puustotunnusten perusteella, ja arvioidaan sen soveltuvuutta korvaamaan erilliset latvuspeittomittaukset. Vaihtoehtona mallin käytölle testataan erilaisia ”perinteisiä” latvuspeiton mittausmenetelmiä ja niille soveltuvia otanta-asetelmia. Kolmas tapa mitata latvuspeittoa olisi estimointi erilaisten kaukokartoitusaineistojen perusteella, mutta kaukokartoitusmenetelmien testaus käytännössä rajattiin tämän työn ulkopuolelle, vaikka teoreettista perustaa selvitetäänkin. Saatujen tulosten perusteella työssä arvioidaan, mikä menetelmä on paras koealakohtaisen latvuspeittotiedon tuottamiseksi erityisesti valtakunnan metsien inventointia varten.

Vastaaville aiemmin latvuspeiton mittaamisesta tehdyille tutkimuksille on tyypillistä, että todellisiin inventointeihin verrattuna mittausasetelmaa on yksinkertaistettu perustamalla koealat tyypillisesti homogeenisiin, varttuneisiin yhden puulajin metsiköihin (esim. Johansson 1984, Rautiainen ym. 2005). Näin on voitu vähentää tarvittavien mittausten määrää, mutta menetelmien soveltuvuus luontaisesti syntyneisiin ja kasvaneisiin metsiköihin on kyseenalainen. Tässä työssä tarkastelua laajennetaan myös eri-ikäisiin ja ei-homogeenisiin metsiköihin.

2. LATVUSPEITON ARVIOINNIN MENETELMÄT

2.1 Harhattomat menetelmät

2.1.1 Cajanuksen putki

Jos latvuspeittoa halutaan mitata harhattomasti, on käytettävä mittavälineitä ja -menetelmiä, jotka todella mittaavat latvuston pystysuoraa projektiota. Klassisin mittaväline, jolla latvuspeittoa on mitattu, on ns. *Cajanuksen putki* (engl. sighting tube, vertical tube tai Cajanus tube) (kuva 2). Cajanuksen putki on yksinkertainen optinen laite, jonka sisällä olevan peilin avulla mittaaja voi katsoa putken läpi ylöspäin ja todeta onko mitattava piste latvuksen alla vai ei. Putken päässä on ”tähtäimenä” ohut ristikko, jota käyttämällä havainnosta saadaan täysin pistemäinen ja siten laite on latvuspeiton mittaamisessa harhaton. Mittauksen aikana putkea pidetään telineessä, jossa putki voi roikkua vapaasti siten että havaittu piste tulee mittauskohdan yläpuolelle. Tosin havaittu piste ei välttämättä, käytetyn putken painotuksesta riippuen, ole täsmälleen mittauskohdan yläpuolella, koska putken kylkeen liitetty lieriö, jonka läpi putkeen katsotaan, muuttaa hivenen instrumentin painopistettä.



Kuva 2. Cajanuksen putki telineessään. Putken sisällä oleva peili heijastaa ylhäältä tulevan kuvan, jota katsotaan kyljessä olevasta tähtäysreiästä (kuva: Pekka Voipio).

Laitteen suomenkielinen nimi juontuu metsätieteilijä-diplomaatti Werner Cajanuksesta, joka toi keksinnön Saksasta Suomeen jo 1910-luvulla latvusten profiileista tehtäviä mittauksia varten; instrumentin avulla voi myös helposti mitata latvuksen leveyden. Uudelleen Cajanuksen putken toi esille Sarvas (1953), joka kuvasi miten laitetta voidaan käyttää latvuspeiton (tai latvusyhteyden, kuten julkaisussa sanotaan) mittaukseen. Tämän jälkeen suomalaisissa julkaisuissa on pitkä tauko, kunnes Rautiainen ym. (2005) totesivat laitteen edelleen käyttökelpoiseksi. Sen sijaan ulkomailla vastaavia mittalaitteita koskevia julkaisuja on ilmestynyt tasaisesti mutta harvakseltaan (mm. Bonnor 1967, Jackson & Petty 1973, Johansson 1984, Ganey & Block 1994, Jennings ym. 1999, Williams ym. 2003).

Mitattaessa latvuspeittoa koealalle perustetaan yleensä systemaattinen pisteverkko, jonka jokainen piste mitataan putkella. Jos metsän rakenne on hyvin säännöllinen, yksinkertainen satunnaisotanta voi olla turvallisempi tapa valita mitattavat pisteet, jolloin autokorrelaation vaikutus poistuu (Johansson 1985). Toinen mahdollisuus on valita pisteiden välimatka siten että se on mitattavaa otosyksikköä eli yksittäisten puiden latvusprojektiota pidempi (Jennings ym. 1999). Latvuspeittoestimaatti saadaan yksinkertaisesti latvuksen alla olevien pisteiden prosenttiosuutena kaikista mitatuista pisteistä (kaava 1):

$$\hat{Z}_{CAJ} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (1)$$

missä $\hat{Z}_{CAJ}$ tarkoittaa latvuspeittoa, δ_i yksittäisen mittauksen tulosta (1 jos peitossa, muulloin 0) ja n kaikkien mitattujen pisteiden määrää.

Cajanuksen putkella mittaamisesta laadituissa julkaisuissa keskeinen tutkimusongelma on ollut se, miten suuri määrä yksittäisiä mittauksia tarvitaan halutun alueen latvuspeiton selvittämiseksi riittävällä tarkkuudella. Selvää on, että latvuspeittoestimaatin keskivirhe kasvaa sitä suuremmaksi, mitä vähemmän pisteitä koealalta on mitattu (Johansson 1984, Jennings ym. 1999, Rautiainen ym. 2005). Johansson (1984) esitti, että 0,1 hehtaarin (25 x 40 m suorakulmainen koeala) latvuspeiton mittaamiseen riittää 200 yksittäistä mittausta, mutta 100 ja 50 pisteen hilat olisivat näin suurelle koealalle liian harvoja. Rautiainen ym. (2005) testasivat

myös koealalta mitatun pistemäärän vaikutusta. Heidän kokeessaan mitattiin 500 pistettä koealan keskeltä alkaen (viisi linjaa viiden metrin välein, mittaukset linjoilla metrin välein), ja tarkkailtiin miten paljon mittauksia vaaditaan, jotta latvuspeiton vaihtelu tasaantuu. Alle sadan pisteen otoksilla vaihtelu oli erittäin suurta, minkä jälkeen vaihtelu alkoi tasaantua, ja n. 250 mitatun pisteen jälkeen uusien pisteiden mittaaminen ei enää juurikaan muuttanut latvuspeiton estimaattia.

Jennings ym. (1999) loivat laajemman katsauksen aiheesta julkaistuun kirjallisuuteen ja osoittivat myös binomikaavan avulla latvuspeitosta tehtyjen mittausten varianssin olevan sitä suurempi, mitä lähempänä 50 prosenttia latvuspeitto on. Myös empiirisissä tutkimuksissa on havaittu latvuspeittoestimaattien olevan epätarkimpia todelliselta latvuspeitoltaan n. 50 prosentin koealoilla (Johansson 1984). Eli jos koealan todellinen latvuspeitto on lähellä nollaa tai sataa prosenttia, tulokset ovat keskimääräistä lähempänä oikeaa arvoa riippumatta mittausten tiheydestä (tai mittausmenetelmästä). Binomikaavan perusteella voidaan myös arvioida tarvittavaa pistemäärää: esimerkiksi jos 20 yksittäisellä mittauksella on saatu latvuspeiton estimaatiksi 50 %, estimaatin 95 %:n luottamusväli vaihtelee alle 30 %:sta aina yli 70 %:n. Tästä syystä Jennings ym. (1999) päätyivät kaavan perusteella hylkäämään alle sadan pisteen otannat, antamatta kuitenkaan tarkempia suosituksia pistemäärästä – mitä enemmän sitä parempi, ja ylärajana voi pitää 400–500 pistettä. Riittävä arvo on joka tapauksessa varsin suuri koealan koosta riippumatta, joten mittaus muodostuu väkisinkin työlääksi (Jennings ym. 1999).

Cajanuksen putkea vastaavia mittavälineitä on Suomen ulkopuolella esitelty useitakin (Walters & Soos 1962, Bonnor 1967, Jackson & Petty 1973, Montaña & Ezcurra 1980, Stumpf 1993). Laitteiden ulkonäkö ja toteutus vaihtelevat, mutta perusidea on kaikissa versioissa sama. Erikseen mainittakoon Amerikassa nimellä ”Densitometri” (Stumpf 1993) markkinoitava mittaväline, joka eroaa Cajanuksen putkesta lähinnä siinä, että putken pystysuoruus varmistetaan telineen sijasta laitteen sisälle sijoitettujen vesivaakojen avulla. Densitometri on siis täysin eri laite kuin luvussa 2.2.3 esitelty densiometri, vaikka nimi onkin miltei identtinen.

2.1.2 Mittanauhamenetelmä eli LIS

Toteutukseltaan hieman Cajanuksen putkella tehtävästä pistehilan mittaamisesta poikkeava menetelmä latvuspeiton mittaamisen on linjaleikkausotanta eli ns. mittanauhamenetelmä (engl. Line Intersect Sampling eli LIS) (mm. Jackson & Petty 1973, O'Brien 1989, Jennings ym. 1999, Williams ym. 2003). Periaatteena on, että koealalle viritetään mittanauha mahdollisimman suorana latvusten alle, ja mitataan kuinka suuri osa nauhasta jää latvusten alle (kaava 2):

$$\hat{Z}_{LIS} = \frac{1}{nL} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^{m_i} l_{ij} \quad (2)$$

missä $\hat{Z}_{LIS}$ on menetelmässä saatu latvuspeittoestimaatti, n linjojen lukumäärä, m_i linjan i alle jäävien latvusmassojen lukumäärä, L yhden linjan pituus ja l_{ij} linjalla i latvusmassan j alle jäävän mittanauhan osan pituus.

Apuvälineenä voidaan tässäkin käyttää esim. Cajanuksen putkea, jonka avulla mitataan missä kohden linjaa latvus alkaa tai päättyy. Latvuspeittoprosentti saadaan siis jakamalla latvusten alla ollut osa nauhasta nauhan koko pituudella. Mittaus on näin luonteeltaan jatkuva, kun taas Cajanuksen putkella tehty mittaus on diskreetti. LIS-menetelmän avulla voidaan välttää Cajanuksen putkella mitattaessa vastaan tulleet ongelmat mittaustiheydestä ja autokorrelaatiosta; ratkaistaviksi jäävät pelkästään linjojen pituus ja sijoittelu. On myös osoitettu, että linjojen sijoittelu voi olla yhtä hyvin systemaattinen kuin satunnainenkin (Jennings ym. 1999, Williams ym. 2003).

2.1.3 Latvusrelaskooppi

Latvusrelaskooppi on laite, jonka avulla latvuston pinta-alaa ja samalla myös latvuspeittoa voidaan estimoida samalla periaatteella kuin relaskoopilla puuston pohjapinta-alaa. Latvusrelaskoopin relaskoopikerroin on huomattavasti suurempi kuin normaalilla relaskoopilla, ja sen hahlo on hyvin korkea, jotta koko puun latvus voidaan arvioida ilman käsivarren nostamista ylöspäin (jolloin relaskoopikerroin muuttuisi). Laite on teoriassa toimiva, mutta käytännön mittaustilanteessa puiden

latvukset yleensä peittävät toinen toisiaan, mikä hankaloittaa mittausta. Laite on myös varsin suurikokoinen, mutta voidaan tarvittaessa rakentaa pienemmäksi. Käytännön inventoinneissa latvusrelaskooppia ei ole vielä kokeiltu, eikä siitä ole olemassa julkaistua tietoa.

2.2 Avauskulmalliset mittavälineet ja -menetelmät

2.2.1 Avauskulman vaikutus latvuspeiton mittauksessa

Edellä esitetyt mittaussmenetelmät ovat latvuspeiton mittauksessa harhattomia, koska mittausta tapahtuu suoraan pystysuunnassa. Avauskulmalliset mittavälineet, joita käytettäessä yhdestä pisteestä mitataan laajempi ala latvustoa, on tarkoitettu latvussulkeuman mittaamiseen, ja niiden avulla saadut latvuspeittoestimaatit ovat harhaisia (luku 1.2). Parasta olisikin, ettei latvuspeittoa mitattaisi ollenkaan avauskulmallisilla menetelmillä. Useissa tutkimuksissa joissa näin on kuitenkin tehty, on havaittu että jos avauskulma on riittävän suppea, ero pystysuoran projektion mittaukseen ei ole kovin suuri (Garrison 1949, Bonnor 1967, Bunnell & Vales 1990). Pienen avauskulman laitteilla mitattuja latvussulkeuman arvoja voidaan siis perustellusti pitää myös melko hyvinä latvuspeiton estimaatteina. Pienenkin avauskulman käytöllä voidaan myös jonkin verran nopeuttaa mittaustyötä verrattuna työläisiin Cajanuksen putkella tai vastaavilla menetelmillä tehtäviin mittauksiin. Sen sijaan laajan avauskulman laitteilla harha on odotetusti ollut merkittävä (Bunnell & Vales 1990, Ganey & Block 1994, Cook ym. 1995), eikä niiden avulla saatuja tuloksia, jotka ovat erittäin hyviä latvussulkeuman estimaatteja, pidä missään nimessä käyttää latvuspeiton arviointiin. Tällaisia välineitä ovat mm. kalansilmälinssillä varustetut kamerat (luku 2.2.2) ja densiometri (luku 2.2.3).

Erisuuruisten avauskulmien vaikutusta latvuspeittoestimaattien tuloksiin on tutkittu varsin ahkerasti, vaikka Jenningsin ym. (1999) määritelmää tiukasti sovellettaessa tällaiset tutkimukset eivät edes ole mielekkäitä, sillä latvuspeittomittaukset tulisi aina tehdä täsmälleen pystysuunnassa ja sulkeumamittaukset mieluiten 180° avauskulmaa käyttäen. Bonnor (1967) totesi merkittävän harhan rajaksi 10° avauskulman. Bunnell & Vales (1990) vertailivat tutkimuksessaan useita erilaisia avauskulmia käytäviä mittavälineitä, ja totesivat avauskulmaltaan selvästi yli 30 asteen menetelmien tuottavan yliarvioita avauskulmaltaan 10 asteen perusmenetelmään

verrattuna. Ganey & Block (1994) löysivät merkittävän eron pystysuoran projektion ja avauskulmaltaan 60°:n densiometrin välillä. Cook ym. (1995) vertailivat myös kahta erilaista densiometriä, joiden avauskulma oli muunnoksen avulla kasvatettu 80 ja 120 asteeseen, käyttäen vertailun pohjana samaa perusmenetelmää kuin Bunnell & Vales (1990). Harhan suuruus oli tällöin 30–40 %.

Laajakulmaisten menetelmien tuloksiin vaikuttavat myös puuston pituus ja latvusraja (luku 1.2). Avauskulmallisia menetelmiä käytettäessä lyhytputustoisilta kuvioilta tarvitaan enemmän mittauksia, jotta latvustoa saadaan mitattua riittävästi (Strandström 1999). Vastaavasti jos puusto on pitkää, yliarvio kasvaa, kuten myös jos puuston pituus pysyy vakiona ja latvusraja alenee. Alhaisen latvusrajan metsiköissä avauskulmallinen mittaus pelkistyy helposti vastaavaksi kuin pistemäinen mittaus, sillä jos mittapiste osuu esim. aivan tuuhean kuusen juurelle, koko havaittu alue on joka tapauksessa peitossa.

2.2.2 Kamera

Kamera on ollut varsin yleinen menetelmä latvuksiin liittyvien tunnusten mittaamisessa. Latvustoa kuvattaessa kamera pidetään pystysuunnassa siten että kameran pohja osoittaa valittuun ilmansuuntaan. Ennen käytössä oli filmikameroita, joiden kuvat skannattiin tietokoneanalysointia varten (esim. Teraoka 1996), mutta nykyään ne on korvattu digikameroilla. Kalansilmäobjektiivilla saadaan kuvattua koko taivaankansi yhdellä kertaa, jolloin latvussulkeumasta ja metsän säteilyoloista saadaan paras mahdollinen arvio. Latvukset erotellaan digitaalisista tai skannatuista kuvista kuvankäsittelyohjelman avulla, minkä jälkeen kuva binarisoidaan eli muutetaan latvukset mustiksi ja taivas valkeaksi. Kuvan ottopaikan latvussulkeuma saadaan selville vertaamalla mustien pikselien määrää koko kuvan pikselimäärään (Strandström 1999). Latvuspeittoa on arvioitu valokuvilta myös silmävaraisesti (O'Brien 1989). Kuvien ottaminen on varsin nopeaa, varsinkin jos kuvaus suoritetaan ilman jalustaa; tällöin arvioon tulee hieman virhettä siitä, ettei kamera ole täysin pystysuunnassa, mutta tämä virhe jää latvuspeittoa arvioitaessa muihin geometrisiin virheisiin verrattuna merkitykseltään vähäiseksi.

Jos digikuvia halutaan käyttää latvuspeiton arviointiin, kameran avauskulman tulisi olla mahdollisimman pieni, tai vastaavasti kuvasta tulisi käyttää vain keskiosa.

Binarisoiduissa kuvissa näkyvät myös latvusten sisäiset aukot, eli kameralla määritetty arvo vastaa vaikuttavaa latvuspeittoa. Jos halutaan arvioida perinteistä latvuspeittoa, kuvat on käsiteltävä siten että latvukset mustataan koko alaltaan (kuva 3).



Kuva 3. Binaarisia latvuskuvia. Latvuspeittoa tai -sulkeumaa voidaan arvioida mustien pikselien määrän perusteella. Vasemmassa kuvassa näkyvät myös latvusten sisäiset aukot. Oikeanpuoleisesta kuvasta sisäiset aukot on poistettu mustaamalla.

Kuvien binarisointi perustuu yleensä kuvan sävyarvojakaumaan, jonka avulla määritetään tietty raja-arvo, jota tummemmat pikselit tulkitaan latvustoksi ja vaaleammat taivaaksi (Teraoka 1996, Strandström 1999, Englund ym. 2000). Menetelmän ongelma on herkkyyys kuvausolosuhteille, sillä latvusten erottelu taivaasta onnistuu hyvin vain, jos kuvaus on tehty ihanneolosuhteissa. Tällöin taivaalta tulee vain hajasäteilyä, eli taivas on tasaisen vaalean pilven peitossa ja latvukset erottuvat kuvassa selvästi taustaa tummempina. Jos kuvauksia on tehty aurinkoisella säällä, taivas on usein syvän sininen ja auringon valaisemat oksat puolestaan vaalean vihreitä, jolloin raja-arvoon perustuva binarisointi ei toimi, vaan kuva joudutaan joko hylkäämään tai binarisoimaan manuaalisesti kuvankäsittely-ohjelman piirtotyökalujen avulla. Viime aikoina on kehitetty myös sääolosuhteet automaattisesti huomioivia binarisointimenetelmiä (Ishida 2004), mutta niiden hyödyntäminen vaatisi erillisten valaistusoloja mittaavien sensorien käyttöä maastossa.

Latvussulkeuman ja metsän säteilyolojen arviointiin menetelmää on käytetty menestyksellisesti useissa tutkimuksissa. Sulkeuman arvioinnissa menetelmä on

erittäin tarkka, varsinkin käytettäessä kalansilmälinssiä (Teraoka 1996, Englund ym. 2000). Strandström (1999) käytti mustattuja latvuskuvia latvuspeiton arviointiin. Mustaus ja latvuspeiton arviointi suoritettiin automaattisesti käyttäen tietokone-ohjelmaa, joka hyödynsi tulkinassa myös puuston pituustietoa. Saatujen latvuspeittoestimaattien luotettavuutta ei kuitenkaan testattu. O'Brien (1989) tutki valokuvilta tehtyjen silmävaraisten arvioiden luotettavuutta, ja totesi tulosten olevan keskimäärin n. prosenttiyksikön yliarvioita ja 50 %:n arvioista jääneen LIS-menetelmällä mitatun kontrolliarvon 95 %:n luottamusvälin ulkopuolelle.

2.2.3 Densiometri

Densiometri (engl. spherical densiometer) (kuva 4) on periaatteeltaan digikameraa vastaava mittaväline, joka on keksitty jo 1950-luvulla (Lemmon 1956). Laitteen ydin on pieneen puurasiaan upotettu kupera tai kovera peili, johon on uurrettu ristikko. Ideana on pitää laitetta käsin vaakatasossa rinnankorkeudella, ja arvioida miten suuren osan peiliin osuvasta ruudukosta latvusten heijastus peittää, kun mittaajan oma pää jää juuri ristikon ulkopuolelle. Peiliin heijastuva kuva on samankaltainen kuin kalansilmälinssillä otetussa valokuvassa, mutta nyt ei tarvita erillistä kuvankäsittelyä vaan latvussulkeuma voidaan arvioida suoraan peiliin uurretun ristikon avulla. Käyttöohjeessa kehoitetaan tekemään luenta neljään eri ilman-suuntaan, sillä laitetta ohjeen mukaan käytettäessä zenitti ei heijastu laitteen keskelle, vaan peilin mittaajan puoleiseen laitaan; lopputulos on näiden neljän luennan keskiarvo. Yleisimmin käytetyn kuperan mallin avauskulma on n. 60°, jota saadaan Stricklerin (1959) muunnoksella, jossa keskimmäiset ruudut jätetään käyttämättä ja mittaus tehdään neljä kertaa eri suuntiin, kasvatettua 120 asteeseen.



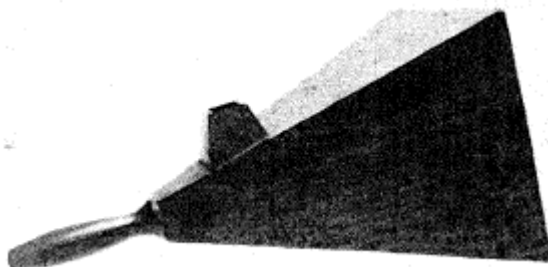
Kuva 4. Densiometri. Latvussulkeumaa ja -peittoa voidaan arvioida laitteessa olevan kuperan peilin heijastamasta kuvasta peiliin uurretun ristikon avulla.

Densiometri ei vastaa tarkkuudeltaan valokuvaa, joten latvuston sisäisiä aukkoja voidaan vain karkeasti arvioida; helpompaa on kuitenkin jättää ne kokonaan huomioimatta. Laitteella voi kuitenkin saada varsin hyvän arvion latvussulkeumasta. Densiometriä on usein virheellisesti käytetty sellaisenaan myös latvuspeiton mittaamiseen. Tällöin harha on ollut luokkaa 30–40 % niin 60 kuin 120 asteen malleilla, ja suurimmillaan alhaisen latvuspeiton kuvioilla (Bunnell & Vales 1990, Cook ym. 1995).

2.2.4 Hirvitorvi

”Hirvitorvi” (engl. moosehorn) (kuva 5) on myös eräs perinteinen, Amerikassa laajalti jo 1940-luvulta lähtien käytetty latvussulkeuman tai -peiton mittausväline (Robinson 1947, Garrison 1949, Bonnor 1967, Bonnor 1968, Bunnell & Vales 1990, Jennings ym. 1999). Nimensä hirvitorvi on saanut prototyypin ulkonäöstä, joka on muistuttanut hirvenmetsästäjien riistan houkutteluun käyttämää torvea (Robinson 1947, Garrison 1949). Laitteen periaate on sama kuin Cajanuksen putkella, mutta itse instrumentti ei ole putkimainen vaan ylöspäin avautuvan pyramidin muotoinen. Pyramidin pohjalla olevaan läpinäkyvään levyyn on merkitty pisteverkko, ja latvuspeittoarvio saadaan laskemalla kuinka suuri osa pisteistä osuu latvuksiin. Jos

mittauksessa käytetään vain laitteen keskimmäistä pistettä, mittaus on samanlainen kuin Cajanuksen putkella (Garrison 1949, Bonnor 1967). Laitetta pidetään kädessä kahvan avulla, tai se voidaan asettaa tukisauvan päähän. Laitteen tasaista suuntaamista helpottaa vesivaaka.



Kuva 5. "Hirvitorvi" on periaatteeltaan samanlainen kuin Cajanuksen putki, mutta ristikko on korvattu laajemmalla pistehilalla, jonka avulla mittaus tehdään (kuva: Robinson 1947).

Latvuspeittoa laitteella hirvitorvella voidaan arvioida kohtalaisen hyvin, kun avauskulma pidetään suppeana jättämällä tarvittaessa uloimmat pisteet pois arvioinnista tai vaihtamalla pistehila kokonaan toiseen (Garrison 1949). Bonnor (1967) käytti erilaisten avauskulmien vaikutusta vertaillessaan muunneltua hirvitorvea, jonka avauskulma oli selvästi Robinsonin (1947) mallia suppeampi, noin 10° . Tällä laitteella kaikkien pisteiden keskiarvona laskettu latvuspeitto ei merkittävästi eronnut pelkästään hilan keskipisteiden avulla saadusta tuloksesta. Bunnell & Vales (1990) käyttivät samankaltaista hirvitorvea kuin Bonnor (1967) perusmenetelmänään. Saadut tulokset eivät eronneet merkittävästi pystysuorasta projektiosta. Hirvitorvi olisi siis edelleen sopiva menetelmä latvuspeiton mittaamiseen, mutta käytännössä sen käyttöä rajoittaa hankala kuljetettavuus, ja niinpä kätevämpi densiometri on syrjäyttänyt sen laajemmassa maastotyössä.

2.2.5 LAI-2000

LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (Welles & Cohen 1996) on lehtialaindeksin eli LAI:n mittaamiseen tarkoitettu instrumentti, joka analysoi antureihin eri kulmista tulevan säteilyn määrää. Toinen anturi sijoitetaan avoimelle paikalle ja toisella mitataan haluttu määrä pisteitä koealalta. Laite mittaa koealan puuston anturiin tuottaman varjostuksen, jonka perusteella voidaan arvioida koealan latvussulkeumaa tai vaikuttavaa latvuspeittoa; laite huomioi aina latvuksen sisäiset

aukot, joten sen avulla ei voi mitata perinteistä latvuspeittoa. Rautiainen ym. (2005) vertasivat Cajanuksen putkella mitattuja perinteisen latvuspeiton arvoja LAI-2000 -laitteella seitsemän asteen avauskulmaa käyttäen mitattuihin vaikuttavan latvuspeiton estimaatteihin. Tulokset korreloivat keskenään hyvin, mutta Cajanuksen putkella mitatut arvot olivat odotetusti jonkin verran LAI-2000 -laitteen tuottamia vaikuttavan latvuspeiton estimaatteja suurempia, koska LAI-2000 huomioi myös latvuston sisäiset aukot.

2.3 Silmävarainen arviointi

Yksinkertaisin ja nopein menetelmä latvuspeiton arviointiin on silmin tehtävä tarkastelu, eli latvuspeitto pyritään määrittämään havaitsijan oman subjektiivisen, omilla silmillä saavutetun näkemyksen mukaisesti. Arvioinnin apuna voidaan käyttää erilaisia koealan pohjapinta-alaan tai latvojen keskiläpimittaan perustuvia taulukoita, jos sellaisia on käytettävissä. Latvussulkeuman ja säteilyolosuhteiden arvioinnissa optimaalisten kasvuolojen aikaansaamiseksi kokemukseen pohjautuvaa silmävaraista arviointia on käytetty parempien vaihtoehtojen puutteessa jo kauan. Silmä on kuitenkin systemaattisten mittausten tekemiseen keho instrumentti, sillä jopa saman arvioijan samalla paikalla tekemät arviot (latvussulkeumasta) voivat vaihdella esim. sääolosuhteiden mukaisesti (Jennings ym. 1999).

Silmävaraiseen arviointiin voidaan myös liittää objektiivisuutta siten että arvioita tehdään systemaattisesti useita eri puolilta mitattavaa aluetta, mutta pienennetään arvioidun alan kokoa (Sarvas 1953, Bunnell & Vales 1990); tällöin menetelmä muistuttaa Cajanuksen putkella tai densiometrillä tehtävää mittausta, mutta mittauksen sijaan kukin piste arvioidaan silmävaraisesti. Tätä menetelmää on myös testattu; silmävarainen arviointi tuotti aliarvioita, kun latvuspeitto oli suuri, ja vastaavasti yliarvioita pienemmän latvuspeiton koealoilla (Bunnell & Vales 1990). Apuvälineen, kuten Cajanuksen putken, avulla mittauksen toistettavuus ja luotettavuus kuitenkin paranevat selvästi (Jennings ym. 1999).

2.4 Latvuspeiton tilastollinen mallinnus puustotunnuksista

Latvuspeiton ja -sulkeuman estimointiin yleisempien ja helposti mitattavien puustotunnuksen kautta on kehitetty myös tilastollisia malleja (Kuusipalo 1985, Mitchell & Popovich 1997, Gill ym. 2000). Mallit toimivat tyypillisesti siten, että esimerkiksi pohjapinta-alan tai runkoluvun kasvaessa myös vaste eli latvuspeitto kasvaa tietyssä suhteessa. Mallien pohjalta voidaan myös laatia taulukoita, joiden avulla voidaan suoraan lukea tiettyä runkolukua tai pohjapinta-alaa vastaava latvuspeitto. Mallipohjaisen lähestymistavan tärkein etu on se, ettei erillisiä latvuspeittomittauksia tarvita lainkaan, vaan latvuspeitto saadaan selville laskennallisesti perinteisistä puustotunnuksista. Tulokset kuvaavat myös suoraan puuston pystysuoraa projektiota, edellyttäen että latvuspeittoaineisto, jonka pohjalta mallit on laadittu, on mitattu harhattomalla menetelmällä.

Yksinkertaisin tapa laatia malleja on käyttää riippuvana muuttujana koealalta mitattua latvuspeittoa, jota selitetään samalta koealalta mitatuilla puustotunnuksilla. Puustotunnuksista voimakkaimmin latvuspeiton kanssa korreloivat yleensä pohjapinta-ala ja runkoluku (Kuusipalo 1985, Mitchell & Popovich 1997, Buckley ym. 1999), joiden lisäksi apuselittäjinä voidaan käyttää esim. puuston keskiläpimittaa, pituutta tai ikää. Erilaisia koealakohtaisia malleja on laadittu aiemmin latvusulkeumalle (Kuusipalo 1985, Mitchell & Popovich 1997) (molemmissa tutkimuksissa tosin puhutaan latvuspeiton mallintamisesta, mutta koska latvusto oli mitattu laajaa avauskulmaa käyttäen, kyseessä on todellisuudessa ollut latvusulkeuman mallinnus).

Latvuspeittoa voidaan ennustaa myös laatimalla malleja yksittäisen puun latvuksen säteelle tai pinta-alalle. Tällaisia malleja on laadittu lähinnä rinnankorkeusläpimittaan perustuen, sillä latvuksen pinta-alan ja rinnankorkeusläpimitan välillä on monilla puulajeilla voimakas lineaarinen riippuvuus (Ilvessalo 1950, Dawkins 1963, Gill ym. 2000). Jos puiden paikat on kartoitettu, mallien avulla voidaan laskea puiden latvusten yhteinen pinta-ala, josta päällekkäin menevät latvukset voidaan poistaa. Tällä menetelmällä on käytännössä päästy noin 10 %:n keskivirheeseen (Gill ym. 2000). Mallia voidaan parantaa poistamalla matemaattisesti koealan

ulkopuolelle jäävien puiden oksien vaikutus (Williams ym. 2003). Jos puiden paikat koealalla mitataan, tämä lienee erittäin tarkka keino mallintaa latvuspeittoa.

2.5 Latvuspeiton estimointi kaukokartoitusaineistoista

Latvuspeitto on tärkeä suure metsän kaukokartoituksessa. Toisinaan ollaan kiinnostuneita suoraan latvuspeitosta, mutta latvuspeiton määrittäminen on myös keskeinen välivaihe esimerkiksi estimoitaessa puuston tilavuutta kaukokartoitusmateriaalien perusteella. Latvuspeiton estimoinnista kaukokartoitusaineistojen avulla on julkaistu paljon tutkimuksia, joihin ei tässä kuitenkaan tarkemmin perehdytä, vaan eri menetelmät käydään läpi yleisellä tasolla muutamien esimerkein.

Kaukokartoitusmateriaalit voidaan tässä yhteydessä jakaa karkeasti kahteen luokkaan: alhaisen resoluution satelliittikuvamateriaaleihin, joissa pikselikoko on yksittäisen puun kokoa suurempi, ja korkearesoluutioisiin laserkeilaus-, ilmakuva- ja satelliittikuvamateriaaleihin, joiden avulla voidaan erottaa yksittäisiä puita. Karkean resoluution satelliittikuvissa sensoriin heijastunut signaali on sekoitus puustosta ja aluskasvillisuudesta tai maaperästä heijastuneista signaaleista. Puustosta heijastuneen signaalin osuutta, joka korreloi latvuspeiton kanssa, voidaan arvioida kuvan eri kanavien (yleensä punainen ja infrapunakanava) sävyarvojen perusteella joko tilastollisesti regressiomallien avulla (Larsson 2002, Lanteri ym. 2004) tai fysikaalisesti tutkimalla latvuston heijastusominaisuuksia (Rosema ym. 1992, Yang & Prince 1997, Gemmell 1999, Gemmell & Varjo 1999, Strandström 1999, Gemmell ym. 2002).

Latvuspeiton estimointia karkean resoluution Landsat TM-kuvilta fysikaalisen kaukokartoituksen ja inversiomallien avulla on tutkittu niin Suomessa kuin muuallakin (Rosema ym. 1992, Gemmell 1999, Gemmell & Varjo 1999, Strandström 1999, Gemmell ym. 2002). Tulokset ovat olleet hyviä yksinkertaisissa tilanteissa kuten hollantilaisessa istutusmetsässä (Rosema ym. 1992), mutta luontaisesti syntyneissä havumetsissä latvuspeiton ennustaminen inversiomallien avulla ei ole toistaiseksi onnistunut kovin hyvin (Gemmell & Varjo 1999, Strandström 1999, Gemmell ym. 2002). Tähän ovat vaikuttaneet inversiomalleissa tehdyt yksinkertaistavat oletukset mm. taustaheijastuksen ja metsän rakenteen vakioisuudesta sekä kuvamateriaalien epätarkkuus (Gemmell 1999, Gemmell & Varjo 1999, Strandström 1999, Gemmell

ym. 2002). Parhaimmillaan on saavutettu 76 prosentin korrelaatio maastossa mitattujen ja Landsat TM -kuvilta estimoitujen latvuspeittoarvojen välillä, kun inversiomalleissa on huomioitu myös latvustosta riippumaton taustaheijastus (Gemmell 1999).

Yksittäisten puiden latvusalojen tulkinnan avulla latvuspeitto saadaan määritettyä huomattavasti tarkemmin. Materiaaliksi tähän kelpaa esimerkiksi ilmakeku tai laserkeilausaineisto. Takavuosina latvuspeitto määritettiin ilmakekulta silmävaraisesti (Bonnor 1968) tai kuvan päälle asetettavan pistehilan avulla (Loetsch & Haller 1973). Nykyisin analysointiin käytetään kuvankäsittelyohjelmia, jotka tunnistavat kekulta sopivan algoritmin avulla yksittäisten puiden latvukset ja laskevat niiden pinta-alat, joiden perusteella saadaan selville myös halutun alueen latvuspeitto (Pitkänen 2001, Culvenor 2003). Yksittäisten puiden latvusalaista voidaan mallien avulla siirtyä edelleen esim. rinnankorkeusläpimittaan tai tilavuuteen (Kalliovirta & Tokola 2005). Ilmakekumateriaalien pahin ongelma on kuvien keskusprojektiio, eli vain suoraan kuvanottopisteen alapuolella olevat puut nähdään pystysuorassa suunnassa, kun taas kauemmaksi jäävät puut näyttävät "kaatuvan" pois päin kuvan keskustasta. Tällöin (ilman geometrisia korjauksia) kuvan laidoilla latvuspeitosta saadaan yliarvio, joten turvallisinta on käyttää arviointiin vain kuvan keskiosaa. Myös varjot haittaavat pienempien puiden löytämistä. Menetelmä on kuitenkin latvuspeiton arvioinnissa yleisesti käytetty ja myös varsin tarkka, jos latvusten tunnistamiseen käytettävä algoritmi on tilanteeseen soveltuva (Culvenor 2003).

Laserkeilaus on tuoreempi, erittäin tarkka kaukokartoitusmenetelmä, jonka avulla voidaan arvioida myös latvuspeittoa. Laserkeilaus on ns. aktiivinen kaukokartoitusmenetelmä, jossa puustotieto saadaan analysoimalla lentokoneeseen sijoitetun keilaimen lähettämien laserpulssien takaisinheijastumista (Wehr & Lohr 1999). Latvuspeittoa voidaan arvioida laseraineistoista kahdella eri menetelmällä. Tiheäpulssisen ($> n. 5 \text{ pulssia/m}^2$) laserkeilauksen avulla voidaan tunnistaa metsiköstä yksittäisiä puita (Maltamo ym. 2004, Næsset ym. 2004, Pitkänen ym. 2004), ja estimoida latvuspeitto suoraan pisteaineistoista löydettyjen puiden latvusaloista. Pienet puut jäävät tosin tätä menetelmää käytettäessä helposti löytämättä (Maltamo ym. 2004). Toinen mahdollinen tapa on määrittää kasvillisuudesta

heijastuneiden pulssien määrä verrattuna maasta heijastuneisiin pulsseihin eli ns. kasvillisuusosuus tai muita vastaavia suureita (Næsset ym. 2004, Suvanto ym. 2005), ja laatia regressiomalli jossa näillä selitetään latvuspeittoa. Tätä menetelmää on sovellettu puustotunnusten estimoinnissa (Næsset ym. 2004, Suvanto ym. 2005), mutta sen on todettu toimivan myös latvussulkeuman määrittämisessä (Lim ym. 2003). Regressiomenetelmän etu on myös se, että tarkkojen arvioiden saamiseksi riittää alhaisempi pistetiheys (esim. yksi pulssi per neliömetri), mikä alentaa kustannuksia (Suvanto ym. 2005).

Korkeaan spatiaaliseen resoluution perustuvien menetelmien käyttöä rajoittavat kuitenkin toistaiseksi laajamittaisiin inventointeihin tarvittavien suurten ilma- tai laserkeilauskuvamäärien hankkimisesta aiheutuvat kustannukset. Tästä syystä näitä menetelmiä ei tässä tutkimuksessa käsitellä enempää.

2.6 Mittaajan vaikutus eri menetelmiin

Mittaajan vaikutus mittauksen lopputulokseen on suoraan riippuvainen käytetystä mittavälineestä ja -menetelmästä. Silmävaraisessa arvioinnissa havaitsijan merkitys on tietenkin aivan ratkaiseva, mutta muiden menetelmien kohdalla tilanne ei ole yhtä selkeä. Johansson (1984) huomasi kokemattoman mittaajan saavan Cajanuksen putkella systemaattisesti askelmitan avulla tehtävässä mittauksessa pienempiä latvuspeittoarvoja kuin kahden kokeneen mittaajan. Erot tuloksissa eivät kuitenkaan olleet merkittäviä, vaan riippuivat lähinnä erilaisista tavoista tulkita epäselviä pisteitä. Cajanuksen putkea voidaankin pitää esimerkkinä menetelmästä, jossa mittaajan vaikutus on varsin pieni. Densiometri on puolestaan useissa tutkimuksissa todettu varsin subjektiiviseksi menetelmäksi, mihin vaikuttavat laitteen tasaisesti paikallaan pitämisen vaikeus (ellei käytetä jalustaa) ja erilaiset tavat tulkita peilin heijastumia (Ganey & Block 1994). Vales & Bunnell (1988) vertailivat mm. hirvitorven, densiometrin ja pistemäisten mittausten avulla saatuja latvuspeittoestimaatteja, ja huomasivat tuloksen riippuvan enemmän käytetyn mittavälineen avauskulmasta kuin mittaajasta. Kirjallisuudessa on myös korostettu, että mittaajan vaikutusta tuloksiin voi huomattavasti minimoida antamalla riittävän tarkka ohjeistus instrumentin käytöstä ja epäselvien tapausten tulkinnasta (Johansson 1984, Vales & Bunnell 1988, O'Brien 1989).

3. AINEISTO JA KÄYTETYT MENETELMÄT

3.1 Mittausasetelma

3.1.1 Latvuspeiton perusmittaus

Perusmenetelmäksi, jolla tehtyjen mittausten pohjalta latvuspeittomallit laadittiin ja jota käytettiin kontrollina eri menetelmien vertailussa, valittiin Cajanuksen putki. Valintaan vaikuttivat Cajanuksen putken käytön pitkät perinteet suomalaisessa metsänarvioinnissa, riittävä ennakkotiedon määrä ja erityisesti harhattomuus.

Kultakin koealalta Cajanuksen putkella mitattava pistehila laadittiin huomioiden kirjallisuuden perusteella luotettavan tuloksen saamiseksi tarvittava pisteiden määrä, vertailtavuus maksimisäteeltään 12,52-metrisiin VMI-relaskooppikoealoihin ja tulosten yhteensopivuus samoilta paikoilta samanaikaisesti mitattujen 20x20 metrinen LAI-koealojen kanssa. Koealaksi valittiin 25x24-metrinen suorakulmio (liite 2, kuva 1), joka sijoitettiin maastoon pääilmansuuntien mukaan siten että etelä-pohjoinen -suuntaisen sivun pituus oli 24 metriä ja itä-länsi -suuntaisen vastaavasti 25 metriä. Latvuspeiton mittausta varten koealalle sijoitettiin 11 kpl etelä-pohjoinen -suuntaisia 25 pisteen linjoja siten että mittapisteiden väli oli yksi metri ja linjojen väli 2,5 metriä. Näin hilan kooksi tuli yhteensä 275 pistettä, minkä arvioitiin riittävän koealan tarkan latvuspeiton selvittämiseen.

Kaikki 275 pistettä mitattiin tähtäämällä latvustoa putken läpi ylöspäin ja kirjaamalla jokaisen mitatun pisteen tulos maastotallentimelle. Tätä varten yksittäiset pisteet oli numeroitu siten että koealan läntisin linja oli linja numero yksi ja tämän linjan eteläisin piste oli piste numero yksi. Seuraavan linjan eteläisin piste oli puolestaan piste numero 26, millä kaavalla jatkaen koealan keskipisteen numeroksi tuli 138 ja vastaavasti koillisnurkassa sijaitsevan viimeisen pisteen numero oli 275 (liite 2, kuva 1). Pisteiden välit mitattiin koealasta riippuen joko askelmitan tai linjalle mahdollisimman suoraan viritetyn mittanauhan avulla; suurimmalla osalla koealoista käytössä oli mittanauha. Mittanauhan virittämistä varten kunkin mitattavan linjan päät merkattiin aputikkujen ja kuitunauhan avulla.

Yksittäisen pisteen mittaus tapahtui putken tähtäysristikon avulla: jos ristikko osoitti latvusta, muistiin merkattiin 1 ja jos ei, 0. Jos piste osui aivan latvuksen ja taivaan rajalle, tulos päätettiin sen mukaan, kumpaa putken muutaman asteen levyisessä näkökentässä näkyi enemmän. Vaikka piste olisi osunut latvuksen sisäisen aukon kohdalle, perinteisen latvuspeiton saamiseksi sisäisiä aukkoja ei eroteltu, vaan ne katsottiin osaksi latvusta. Kaikkien elossa olevien oksien katsottiin kuuluvan latvukseen riippumatta siitä, miten tiheitä tai harvoja ne neulasistoltaan tai lehdiltään olivat; niinpä yksittäinen, muusta latvuksesta erottuva kuusenoksa laskettiin mukaan latvuspeittoon, vaikka se ei juuri pidättäisikään taustalta tulevaa valoa. Sen sijaan kuivat oksat katsottiin latvuspeittoon kuulumattomiksi, ellei niitä ollut niin paljon, että ne selkeästi peittivät taustalla olevan taivaan näkyvistä: tällainen tilanne saattoi esiintyä jos koealalle sattui esim. pystyyn kuollut kuusi, jonka alle mittapiste osui.

Koska Cajanuksen putkella mitattaessa putken pää on, mittaajan pituudesta riippuen, n. 1,6–1,8 metrin korkeudella, varsinkin taimikkokuvioilla sattui usein tilanteita, joissa putken läpi katsottuna näkyi vain taivasta, mutta putken tukivarsi kulki taimen latvuksen läpi, eli latvuspeittoa kertyi mittauskorkeutta alempaa. Nämä pisteet otettiin latvuspeittoon mukaan, jos puu, joka ”alapeiton” aiheutti, oli pituudeltaan yli 1,3 metriä. Sen sijaan alle 1,3 metrin mittaiset puut katsottiin tässä tutkimuksessa aluskasvillisuudeksi, joista syntyvää latvuspeittoa ei huomioitu; toisaalta tämän ongelman vähentämiseksi koealoja ei edes perustettu keskipituudeltaan alle kaksimetrisiin taimikoihin.

3.1.2 Muut latvuspeiton mittausmenetelmät

Muita testattuja maastomittausmenetelmiä olivat LIS, digikamera, kupera densiometri ja silmävarainen arviointi. Näistä myös LIS olisi soveltunut erinomaisesti perusmenetelmäksi. Kaikkia eri menetelmiä ei testattu kaikilla mitatuilla koealoilla, vaan noin kolmasosa kaikista koealoista valittiin ns. vertailukoealoiksi, jotka mitattiin useampaa menetelmää käyttäen. Myös nämä koealat olivat mukana mallinnuksessa. Vertailukoealat mitattiin Cajanuksen putken avulla kuten muutkin koealat, mutta koska vertailussa kiinnostuksen kohteena oli nimenomaan ympyränmuotoisen VMI-koealan latvuspeitto, muihin menetelmiin verrattava latvuspeiton arvo saatiin rajaamalla suorakulmaisen koealan pisteistä pois ne, jotka

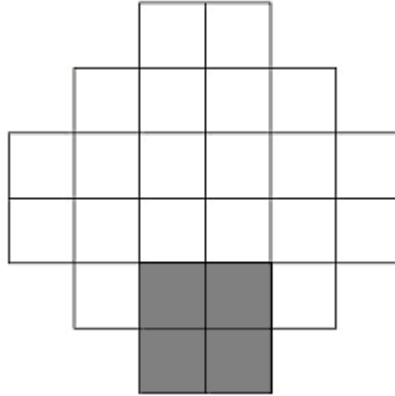
jäivät säteeltään 12,52-metrinen VMI-koealan ulkopuolelle (liite 2, kuva 1). Näin latvuspeiton kontrolliarvoja laskettaessa mukaan otettiin vain 195 pistettä 275:stä. Lisäksi näistä 195 pisteestä valittiin vielä vertailua varten erilliset otokset, joiden koot olivat 102, 49 ja 23 pistettä (liite 2, kuvat 2-4); näiden avulla voitiin tarkastella otoskoon pienenemisen vaikutusta latvuspeittoestimaatin tarkkuuteen.

LIS-menetelmällä mitattiin samat linjat kuin Cajanuksen putkella, jolloin niitä ei tarvinnut merkitä maastoon erikseen. Tutkimuksen kannalta olisi kenties ollut kiinnostavampaa, jos LIS-linjat olisi mitattu eri suunnassa kuin putkella mitatut linjat, mutta ajansäästön takia valittiin samojen linjojen uusintamittaus. Linjoilta huomioitiin vain 12,52-metrinen ympyrän sisään jäävät osat, vastaavasti kuin edellä Cajanuksen putkea koskien todettiin. LIS-menetelmää käytettäessä linjalle osuvien latvusten tai latvusryhmien alku- ja loppupisteet mitattiin Cajanuksen putken ja mittanauhan avulla 0,1 metrin tarkkuudella, ja tulokset tallennettiin maastotallentimelle.

Digikamera otettiin vertailuun teoreettisesta harhaisuudestaan huolimatta, koska valokuvia on Suomessakin aiemmin käytetty myös latvuspeiton arviointiin (Kuusipalo 1985, Strandström 1999). Kamerana oli normaali, vanhahko digikamera, jonka polttoväli oli kuvauksissa käytetyllä pienimmällä suurennoksella kinkkoiseksi suhteutettuna 28 mm, mikä vastaa 56 asteen (horisontaalista) avauskulmaa. Kymmenen metrin korkeudella kuvan leveys oli siis 12,5 metriä. Kullakin koealalla otettiin viisi kuvaa, joista ensimmäinen koealan keskipisteestä ja muut neljä väli-ilmansuunnissa n. 8,5 metrin päässä koealan keskustasta. Jos kuvan ottopisteen kohdalle osui puun runko, kuvauspiste siirrettiin puolen metrin päähän rungosta. Kuvan paikka määritettiin askelmitalla kulkemalla koealan nurkkia kohti tai kompassin avulla. Kuvauspisteessä kuva otettiin pitämällä kameraa rinnan- korkeudella kameran objektiivi ylöspäin ja pohja etelään suunnattuna silmämääräisesti katsottuna mahdollisimman suorassa.

Densiometriä ei käytetty perinteiseen tapaan laitteen koko ristikkoa käyttäen, vaan laitteen avauskulman pienentämiseksi kehitettiin uusi muunnos, jossa huomioitiin vain laitteen ristikon neljän mittaajaa lähinnä olevan ruudun muodostama neliömäinen alue (kuva 6). Muunnoksen käyttöön päädyttiin, koska digikamera

edustaa testissä laajakulmaista mittavälinettä, ja densiometristä haluttiin vastaavasti suppeamman avauskulman laite. Muunnoksen avulla densiometrin avauskulmaksi tuli noin 20°. Käytettävät neljä ruutua valittiin ristikon käyttäjän puoleisesta päästä, koska kuperan densiometrin peilistä zeniiitti ei heijastu käyttäjän silmään ristikon keskuksen kautta (pelin keskipisteessä zeniiitistä tuleva valo heijastuu takaisin ylöspäin), vaan muunnokseen valitulta alueelta (jolta zeniiitistä tuleva valo heijastuu käyttäjään päin).



Kuva 6. Densiometristä (kuva 4) käytettiin muunnosta, jossa latvuspeitto arvioitiin vain peilin neljää lähinnä mittaajaa olevaa ruutua käyttäen.

Yksittäinen mittausta tehtiin arvioimalla montako neljänneestä kustakin käytetyistä neljästä ruudusta latvusto peittää, ja tallennettiin peitossa olleiden neljännesten summa (esim. 4 + 3 + 1 + 0 = 8, ja koska 8 / 16 = 0,5, latvuspeitto olisi tällaisessa pisteessä 50 %). Koko koealan latvuspeittoestimaatti laskettiin seuraavasti (kaava 3):

$$\hat{Z}_{DEN} = \frac{1}{16n} \sum_{i=1}^n \delta_i \quad (3)$$

jossa $\hat{Z}_{DEN}$ tarkoittaa latvuspeittoestimaattia, δ_i yksittäisen mittauksen tulosta (välillä 0-16) ja n koealalta tehtävien mittausten lukumäärää. Densiometrillä mitattiin samat linjat kuin Cajanuksen putkella ja LIS-menetelmällä (ympyräkoalan sisään jääviltä osiltaan), mutta mitattavien pisteiden väliksi valittiin neljä metriä putkella käytetyn metrin sijasta, koska avauskulmallinen laite havaitsee kerralla suuremman osan latvustoa. Näin kultakin koealalta tehtiin 49 mittausta, joiden perusteella densiometrin latvuspeittoarvio laskettiin. Näistä 49 pisteestä poimittiin vielä erilliset 23 ja yhdeksän pisteen otokset tarvittavan mittaussuuremäärän arvioimiseksi. Mitattujen

pisteiden sijoittuminen vastaa samankokoisia Cajanuksen putkella mitattuun aineistoon tehtyjä otantoja (lukuun ottamatta yhdeksän pisteen otantaa, jota ei käytetty Cajanuksen putkelle) (liite 2, kuvat 3-4). Lisäksi densiometrillä tehtiin erillinen subjektiivinen kymmenen pisteen otanta, jossa mittaaja mittasi densiometrillä kymmenen itse valitsemaansa, koealalle tasaisti ja edustaviin paikkoihin sijoitettua pistettä. Subjektiivinen densiometrimittaus erosi systemaattisesta myös siinä, että taimikoissa mittaus tehtiin rinnankorkeuden sijasta tarvittaessa niin alhaalta, että lyhyellä puustolla oli suurempi mahdollisuus tulla havaituksi.

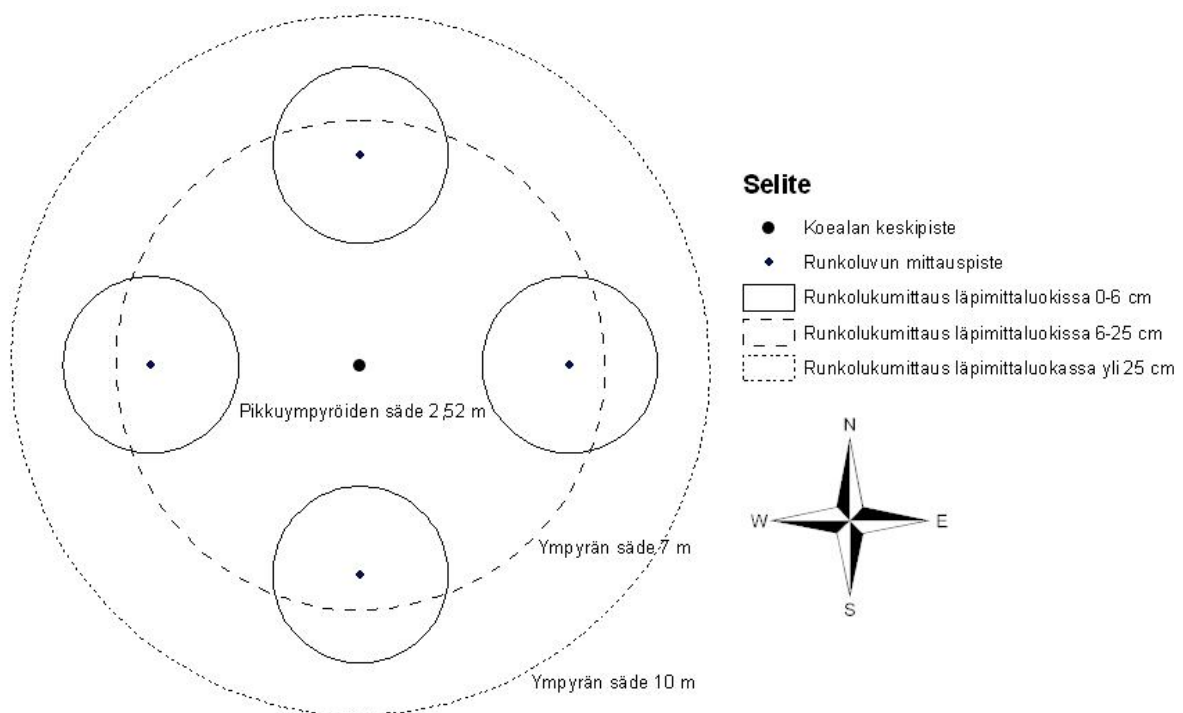
Silmävarainen arviointi tehtiin yksinkertaisesti arvioimalla koealan latvuspeitto ilman mitään apuvälineitä tai systemaattisuutta. Arviointia suoritti yhteensä kolme henkilöä: mittaaja arvioi koealan latvuspeittoa ennen mittauksen alkua, ja mittausten päätyttyä kaksi valtakunnan metsien inventoinnin ryhmänjohtajaa kiersi arvioimassa mitatut koealat samalla menetelmällä kuin VMI:ssä oli kesän 2005 aikana tehty.

3.1.3 Puustotunnusten mittaus

Jokaiselta koealalta mitattiin mallien laatimista varten seuraavat puusto- ja metsikkötunnukset:

- Kasvupaikka (VMI-ohjeiden (Metsäntutkimuslaitos 2005) mukaisesti)
- Kehitysluokka (VMI-ohjeiden mukaisesti)
- Puuston pohjapinta-ala
 - Mitattiin relaskoopilla koealan keskipisteestä täydellisenä koealana. Lisäksi 25x24 metrin koalan kunkin sivun keskipisteestä mitattiin puolikas 180 asteen relaskooppikoeala (siten että puoliympyrä tuli päin koealan keskipistettä) ja kerrottiin tulos kahdella. Kunkin mittapisteen todellinen pohjapinta-ala tallennettiin erikseen.
 - Jos keskiläpimitan arvioitiin olevan alle 15 cm, käytettiin relaskooppikerrointa yksi ja muulloin kerrointa kaksi, jolloin todellinen pohjapinta-ala saatiin kertomalla mitattu arvo kahdella.
- Taimikoissa taimien runkoluku ositteittain
 - Mittaus kahdelta silmävaraisesti edustavaan paikkaan sijoitetulta 2,52 m säteiseltä pikkuympyrältä (kahden 2,52 m ympyrän ala on 40 m², joten jokainen luettu puu vastaa 250 runkoa hehtaarilla).

- Runkoluku läpimittaluokittain, kaikki puulajit yhdessä
 - Laskettiin puiden kappalemäärät rinnankorkeusläpimittaluokan mukaan vastaavalta ympyrältä (kuva 7)
 - 0,1 – 1,0 cm; 4 x 2,52 m säteiset ympyrät pääilmasuunnissa 6 m päässä koealan keskipisteestä. (ala 80 m²; yksi runko edustaa 125 runkoa/ha)
 - 1,1 – 6,0 cm; 4 x 2,52 m säteiset ympyrät pääilmasuunnissa 6 m päässä koealan keskipisteestä
 - 6,1 – 12,0 cm; 7 m säteinen ympyrä (ala 154 m²; 1 runko edustaa 65 runkoa/ha)
 - 12,1 -25,0 cm; 7 m säteinen ympyrä
 - Yli 25 cm; 10 m säteinen ympyrä (ala 314 m²; 1 runko edustaa 31,8 runkoa/ha)
 - Kirjattiin aina kappalemäärä kokonaisella koealalla muuntamatta hehtaari-kohtaiseksi arvoksi.



Kuva 7. Runkolukujen mittaus läpimittaluokittain. Eri läpimittaluokat mitattiin eri-kokoisilta ympyröiltä.

Pohjapinta-ala-mediaanipuulta ositteittain lisäksi

- Pituus (Vertex-korkeusmittarilla)
- Läpimitta
- Latvusrajan korkeus
- Ikä (latvuskiehkuroista laskemalla tai kasvukairan avulla, jolloin ikälisäykset VMI-ohjeen mukaisesti)

3.2 Aineisto ja sen käsittely

3.2.1 Maastotyö

Mittaukset toteutettiin Suonenjoella Pohjois-Savossa kesällä 2005. Pää tutkimusalueena oli Metlan Suonenjoen tutkimusaseman läheisyydessä sijaitseva Hirsikankaan alue (n. 62° 38' N, 27° 01' E), joka kuuluu myös kansainväliseen kaukokartoituksen tutkimusalueiden VALERI-verkostoon (VALERI-projekti 2005). Hirsikankaalla puusto on mäntyvaltaista, kuivahkoa harjumaastoa, jolta löytyi kaikenikäisiä männiköitä. Vaikka Hirsikankaan lähiympäristöstä löytyi jonkin verran myös rehevämpää kuusivaltaista maastoa, kattavamman kuusiaineiston saamiseksi lisäkoealoja perustettiin Saarisen alueelle (n. 62° 40' N, 27° 29' E) n. 20 kilometriä Suonenjoen keskustasta Kuopion suuntaan. Saarisella koealat olivat eri-ikäisiä tuoreen ja lehtomaisen kankaan kuusikoita

Kuviot, joille koealat sijoitettiin, määritettiin etukäteen kuviotietojen perusteella siten, että aineistosta saataisiin kohtuullisella työmäärällä mahdollisimman monipuolinen. Koealan täsmällinen sijainti kuviolla joko määrättiin etukäteen kuviokartalta, jolloin paikalle suunnistettiin GPS-satelliittipaikantimen avulla, tai kulkemalla askelmitalla määrätty matka kuvion reunalta sen keskustaan päin. Kaikkien koealojen tarkka sijainti määritettiin differentiaalikorjatuin GPS-mittauksin myöhempää käyttöä varten. Koealoja sijoitettaessa pyrittiin mahdollisimman suureen vaihteluun seuraavien rajauksin: koealojen oli oltava havupuuvaltaisilla kivennäismaan kuvioilla, jotka ovat kehitysluokaltaan vähintään varttuneita taimikoita (pienien taimikoiden mittaaminen ei käytetyillä määritelmillä ollut mielekästä). Lisäksi koealojen tuli sijaita vähintään 20 metrin päässä kuvion rajoilta, mielellään hieman kauempanakin. Kaikki puusto- ja latvuspeittomittaukset lukuun ottamatta suoritti sama mittaja.

Yhteensä ym. määritelmien mukaisia koealoja saatiin mitattua 65 kappaletta, joista 21 Saarisen alueelta. 19 koealaa 65:stä mitattiin vertailukoealoina, joilla käytettiin kaikkia eri latvuspeiton mittausmenetelmiä; muilla koealoilla mitattiin vain puustotunnukset ja latvuspeitto Cajanuksen putkella. Mäntyvaltaisia koealoja oli 34 ja kuusivaltaisia 31 kappaletta; pääpuulajiksi valittiin se havupuulaji, jonka pohjapinta-ala oli koealalla suurin.

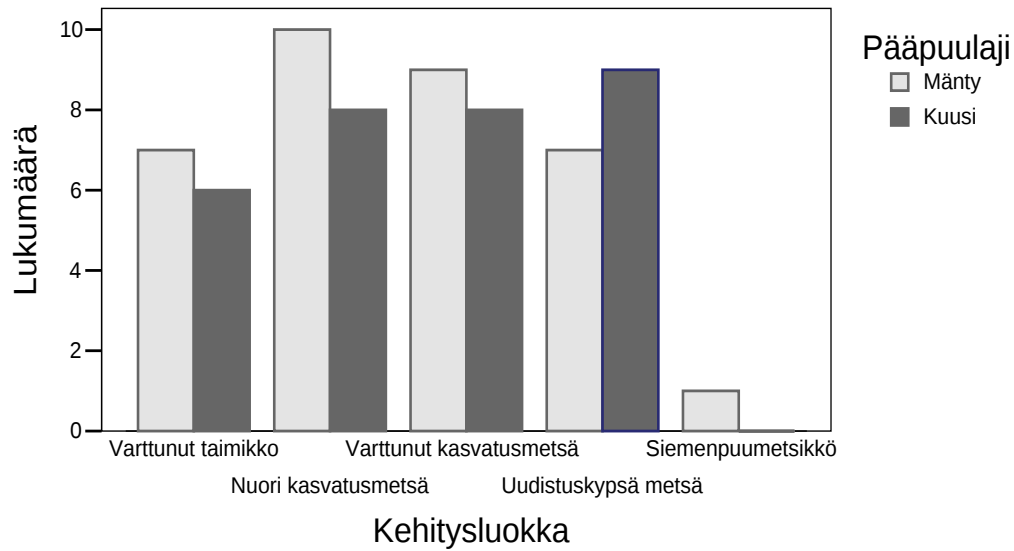
3.2.2 Koealatunnusten laskenta

Maastossa kämmentietokoneelle tallennetun aineiston perusteella laskettiin koealoille eri tunnusten lopulliset arvot. Cajanuksen putkella, mittanauha-menetelmällä ja densiometrillä mitatut latvuspeittoestimaatit laskettiin keskiarvoina kaavojen 1, 2 ja 3 mukaisesti. Puustotunnuksista pohjapinta-ala laskettiin koealalta tehdyn viiden relaskooppimittauksen perusteella painotettuna keskiarvona siten, että keskimmäisen relaskooppikoealan painokerroin oli yksi ja koealan laidoilta mitattujen 0,5. Koealakohtaisia pohjapinta-aloja ja runkolukuja laskettaessa huomioitiin kaikki mitatut ositteet; muutoin aineistoa käsiteltiin ositteittain. Koealakohtaisena läpimittana ja pituutena käytettiin pääpuulajilta mitattua arvoa sellaisenaan.

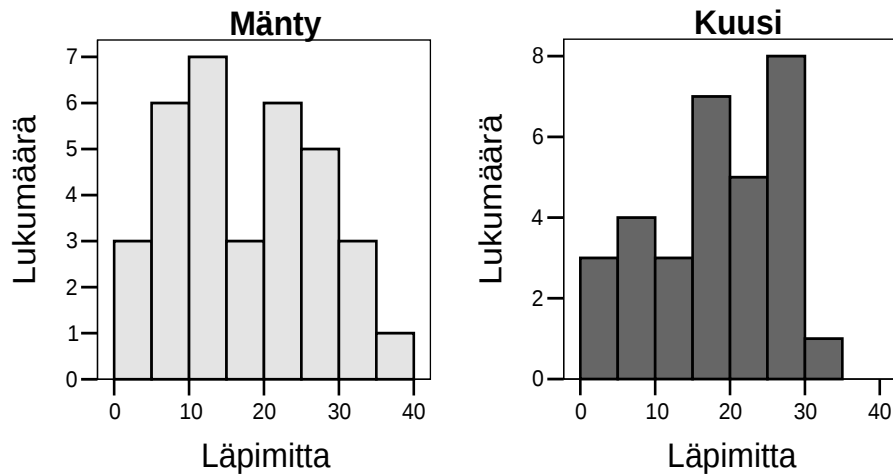
Digikuvien käsittelyyn kuului binarisointi Paint Shop Pro -ohjelman piirtotyökalujen avulla, minkä jälkeen vaikuttavasta latvuspeitosta saatiin estimaatti eri kuvien mustien ja valkoisten pisteiden suhteesta. Perinteisen latvuspeiton arviointia varten kaikki kuvissa olevat latvukset väritettiin manuaalisesti mustiksi ja sama analyysi toistettiin mustatuille kuville.

3.2.3 Aineiston yleiskuva

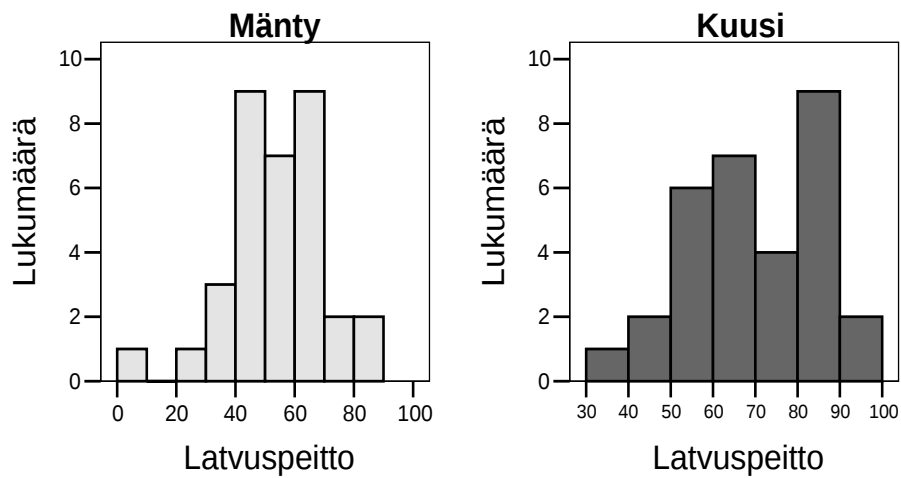
Koealoja valittaessa pyrittiin mahdollisimman tasaiseen ja vaihtelevaan aineistoon. Seuraavassa on esitetty histogrammeina koealojen jakauma kehitysluokan, latvuspeiton, pohjapinta-alan, pääpuulajin keskiläpimitan ja runkoluvun mukaan (kuvat 8–12).



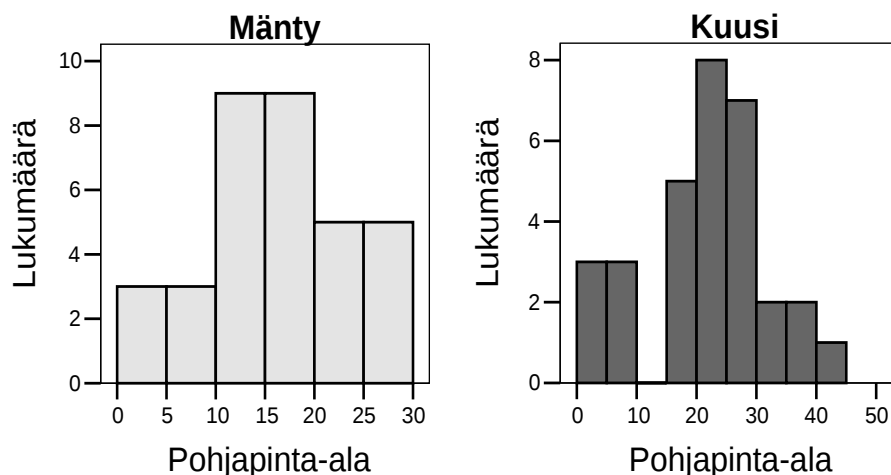
Kuva 8. Aineiston kehitysluokkajakauma puulajeittain.



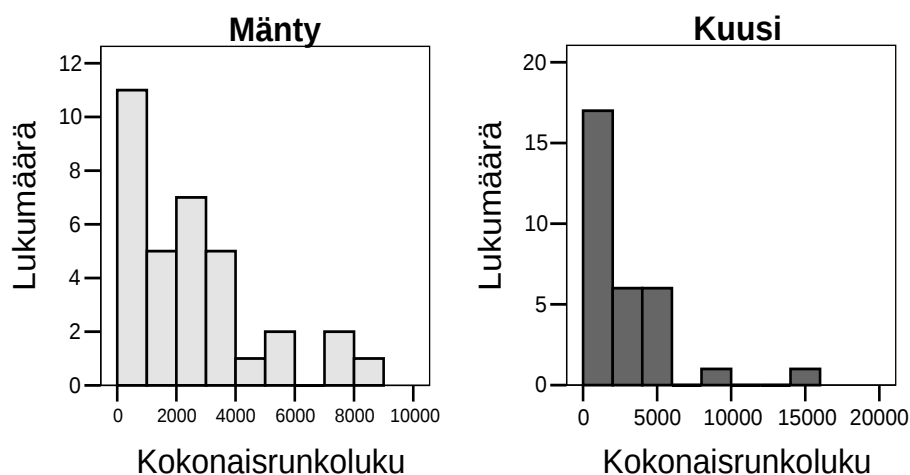
Kuva 9. Aineiston läpimittajakauma puulajeittain (cm).



Kuva 10. Aineiston latvuspeittojakauma puulajeittain (%).



Kuva 11. Aineiston pohjapinta-alajakauma puulajeittain (m²/ha).



Kuva 12. Aineiston runkolukujakauma puulajeittain (kpl/ha).

Kehitysluokkajakaumaltaan aineisto on männiköiden osalta varsin tasapainoinen, kun taas kuusikkoaineisto painottuu vanhempiin metsiköihin. Läpimittajakaumista voi tehdä saman johtopäätöksen. Syynä kuusikoiden jakauman vinouteen on se, ettei takavuosien metsänkäsittelyoppien vuoksi tutkimusalueelta juurikaan löytynyt nuorehkoja, taimikkovaiheen ohittaneita kuusimetsiä.

Latvuspeitoltaan aineisto painottuu keskitiheisiin, n. 50 prosentin latvuspeiton metsiköihin. Rehevillä kuusivaltaisilla koealoilla latvuspeitto on keskimäärin huomattavasti suurempi kuin karuilla männikkökoealoilla. Mäntyaineistosta puuttuvat kokonaan suurimmat, sataa prosenttia lähenevät latvuspeiton arvot, ja kuusikoista vastaavasti pienet arvot. Pohjapinta-alajakaumat ovat melko tasaisia, painottuen männiköillä n. 15 m²/ha ja kuusikoilla n. 25 m²/ha tienoille. Runkoluku-

jakaumissa erottuvat lähinnä muutamat runkoluvultaan suuret taimikot, valtaosan koealoista sijoittuessa mitta-asteikon alapäähän.

19 vertailukoealasta yhdeksän oli kuusivaltaisissa metsissä ja neljä taimikoissa. Neljästä taimikoista kaksi oli kuusen taimikoita, joiden keskipituus oli selvästi lyhempi kuin kahden vertailussa olleen männyntaimikon. Nämä lyhyet kuusen-taimikot näkyivät vertailussa usein muista poikkeavina havaintoina, lähinnä lyhyt-kasvuisuutensa ja runsaan lehtipuualikasvoksen aiheuttaman suuren runkoluvun takia.

3.3 Tilastolliset menetelmät

3.3.1 Mallinnus

Tilastolliset mallit latvuspeitolle laadittiin käyttäen usean selittäjän lineaarista regressioanalyysiä ja pienimmän neliösumman menetelmää. Eri mallien paremmuutta arvioitiin lähinnä selitysasteen, sopeutetun selitysasteen (joka voi myös huonontua selittäjien lisääntyessä) ja mallin keskivirheen avulla. Myös erilaisia residuaalikuvioita hyödynnettiin mallien laadinnan apuvälineinä. Mallinnus suoritettiin SPSS-ohjelmiston avulla. Selitettävänä latvuspeittona käytettiin kaikkien koealalta mitattujen 275 pisteen keskiarvona saatua tulosta.

3.3.2 Eri menetelmien vertailu

Eri mittausmenetelmien harhaa ja tarkkuutta selvitettiin mittaamalla 19 koealaa useammalla eri menetelmällä. Menetelmien vertailu perustui eri menetelmien koealakohtaisten tulosten vertailuun vastaavaan Cajanuksen putken 195 pisteen hilalla saatuun tulokseen. Vertailua varten laskettiin eri menetelmien erotukset Cajanuksen putkella saatuun tulokseen verrattuna, jolloin eri koealoilta saatuja erotuksia voitiin käsitellä riippumattomina otoksina.

Eri koealoilta saatujen erotusten keskiarvo kuvaa tutkitun menetelmän harhaa Cajanuksen putkeen verrattuna ja keskiarvon keskivirhe sitä miten luotettava saatu keskiarvo on. Negatiivinen keskiarvo tarkoittaa, että menetelmän antamat tulokset ovat keskimäärin aliarvioita, ja positiivinen vastaavasti yliarvioita. Keskihajonta

kuvaa yksittäisen tuloksen keskimääräistä poikkeamaa koko menetelmän keskiarvosta. Ihanteellisen menetelmän erotuksien keskiarvo olisi nolla, eli tulokset olisivat keskimäärin samoja kuin Cajanuksen putkella, ja keskihajonta olisi alhainen, jolloin tulokset poikkeaisivat keskiarvosta yleensä vain vähän.

Keskiarvoihin ja -hajontoihin perustuvaa tulkintaa haittasi kuitenkin verrattavien jakaumien vinous ja runsas poikkeavien havaintojen määrä, minkä takia keskiarvo ja -hajonta saattoivat toisinaan antaa aineistosta harhaanjohtavan kuvan. Tämän takia keskiarvojen vertailun rinnalla käytettiin myös mediaaneihin ja kvartiiliväleihin perustuvaa analyysiä, jossa poikkeavien havaintojen ja jakaumien vinouden vaikutus ei näy. Boxplot-kuvio on eräs mediaaneihin pohjautuva tapa aineiston menetelmäkohtaiseen visualisointiin. Kuviossa kunkin palkin keskellä näkyvä viiva kuvaa menetelmän erotusten mediaaniarvoa, laatikon ylä- ja alalaidat erotusten ylä- ja alakvartiileja (eli pisteitä joiden välissä on 75 % kaikista havainnoista). Viiksien pituus on joko minimi- tai maksimiarvoon asti, tai enintään 1,5 kertaa laatikon sivun pituus. Viiksen maksimipituutta kauempana olevat poikkeavat havainnot merkitään erillisinä pisteinä.

Eri menetelmien erojen tilastollista merkitsevyyttä testattiin epäparametrisen yksisuuntaisen Kruskal-Wallis -varianssianalyysin avulla (Zar 1984, s. 176). Koska normaalin varianssianalyysin oletukset vertailtavien jakaumien normaalisuudesta eivät täyttyneet, analyysissä päädyttiin valitsemaan epäparametrinen vaihtoehto, jossa koealakohtaiset eri menetelmien erotukset asetetaan suuruusjärjestykseen, ja vertailu tehdään eri menetelmillä saatujen havaintojen järjestyslukujen (engl. rank) keskiarvoihin perustuen. Analyysi tehtiin SPSS-ohjelmistolla.

Vastaavissa tutkimuksissa eri menetelmien keskiarvojen testaamiseen on käytetty myös pareittaisia t-testejä (Ganey & Block 1994, Bonnor 1967). Koska verrattavia menetelmiä on tässä työssä useita, kasvaa todennäköisyys sille että joidenkin menetelmien välillä havaitaan ero 5 % merkitsevyystasolla, vaikkei sitä todellisuudessa ole. (Kun yhtä menetelmää verrataan kontrolliin t-testillä 5 %:n merkitsevyystasolla, havaittu ero on todella merkitsevä 95 %:n todennäköisyydellä, mutta jos tehdään samanlainen testi toiselle menetelmälle, todennäköisyys sille että jommassakummassa testissä tehtiin virhe, on enää $0,95 \times 0,95 = 90$ %. Virheen

todennäköisyys siis kasvaa vertailujen määrän kasvaessa.) Tämän takia varianssi-analyysi on tässä tapauksessa pareittaisia vertailuja turvallisempi vaihtoehto, sillä sen avulla voidaan testata useampia eri menetelmiä yhdellä testillä.

Varianssianalyysissä nollahypoteesina oli, ettei eri menetelmien mediaanien välillä ole eroja, ja vastahypoteesina että jokin menetelmä poikkeaa muista. Monivertailujen avulla voitiin lisäksi selvittää, mitkä menetelmät erosivat toisistaan. Monivertailu suoritettiin Zarin (1984, s. 201) esittämällä tavalla, jossa kontrollia vertaillaan muihin menetelmiin. Testisuure Q laskettiin kaavalla (kaava 4):

$$Q = \frac{\bar{R}_B - \bar{R}_A}{SE} \quad (4)$$

missä $\bar{R}_B$ ja $\bar{R}_A$ ovat Kruskal-Wallis -varianssianalyysistä saadut verrattavien menetelmien A ja B järjestyslukujen keskiarvot ja keskivirhe SE laskettiin kaavalla (kaava 5):

$$SE = \sqrt{\left(\frac{N(N+1)}{12} - \frac{\sum T}{12(N-1)}\right)\left(\frac{1}{n_A + n_B}\right)} \quad (5)$$

missä N on vertailtavien tapausten lukumäärä sekä n_A ja n_B havaintojen lukumäärät vertailtavissa ryhmissä. Sidosten eli aineistossa olevien yhtäsuurien havaintojen määrää kuvaava tunnusluku määrää kuvaava tunnusluku lasketaan kaavalla (kaava 6):

$$\sum T = \sum t_i^3 - t_i \quad (6)$$

jossa t_i on sidosten lukumäärä sidosryhmässä i .

Testisuureta Q verrattiin taulukosta (Zar 1984, s. 569) saatuun kriittiseen arvoon, ja jos testisuureen itseisarvo oli kaksisuuntaista kriittistä arvoa suurempi, menetelmien välinen ero oli tilastollisesti merkitsevä.

Vertailtavia menetelmiä oli kuusi kappaletta (Cajanuksen putki, LIS, densiometri, silmävarainen arviointi, digikuvat ja regressiomallit) mutta eri menetelmien lisäksi testattiin myös erilaisia toteutustapoja, jolloin vertailtavien tapausten määräksi tuli 17.

1. Cajanuksen putki, 195 pistettä (kontrolli)
2. Cajanuksen putki, 102 pistettä
3. Cajanuksen putki, 49 pistettä
4. Cajanuksen putki, 23 pistettä
5. LIS-menetelmä
6. Densiometri, 49 pistettä
7. Densiometri, 23 pistettä
8. Densiometri, 9 pistettä
9. Densiometri, 10 pisteen subjektiivinen mittaus
10. Mittaajan silmävarainen arvio
11. Ryhmänjohtajan A silmävarainen arvio
12. Ryhmänjohtajan B silmävarainen arvio
13. Digikuvat
14. Mustatut digikuvat
15. "Pieni" malli
16. "Vain keskeltä mitattu ppa" -malli
17. "Iso" malli

Tapaukset 1-14 on kuvattu luvussa 3.1.2. Tapaukset 15–17 ovat regressiomalleja, joiden toimivuuden tutkiminen latvuspeiton estimoinnissa maastomittauksiin verrattuna on työn keskeisimpiä aihepiirejä. Mallien vertailua varten aineiston 19 vertailukoealaa valittiin kontrolliaineistoksi, ja mallit sovitettiin uudelleen puulajeittain aineistoon josta vertailukoealat oli poistettu. Selitettävänä latvuspeittona käytettiin 275 pisteen sijasta 12,52-metrinen ympyrän sisälle jääneitä 195 pistettä.

Muodoltaan vertailussa käytetyt mallit vastasivat luvuissa 4.1.3 ja 4.1.4 esiteltyjä kahden ja useamman selittäjän malleja, ja ne on esitelty erikseen luvussa 4.1.5. Näille malleille esitetty keskivirhe on mallin virhe sovitusaaineistossa, ja RMSE

(kaava 7) on laskettu kontrolliaineistolle ennustettujen latvuspeittoarvojen perusteella. RMSE lasketaan kaavalla

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n - p}} \quad (7)$$

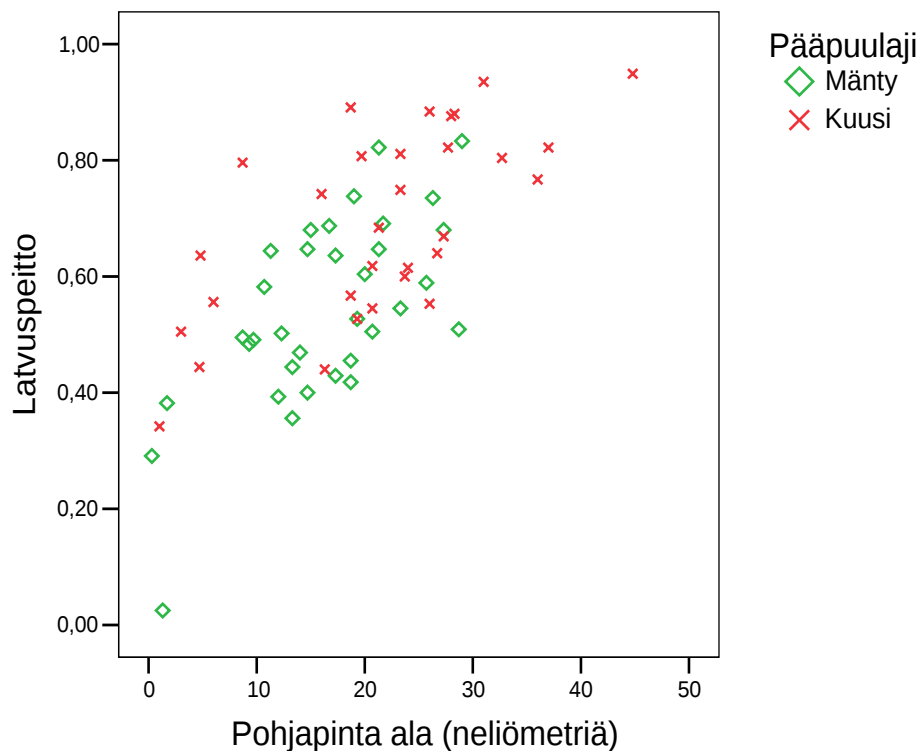
missä y_i on mitattu arvo, $\hat{y}_i$ ennustettu arvo sekä n ja p havaintojen ja selittäjien lukumäärät.

4. TULOKSET

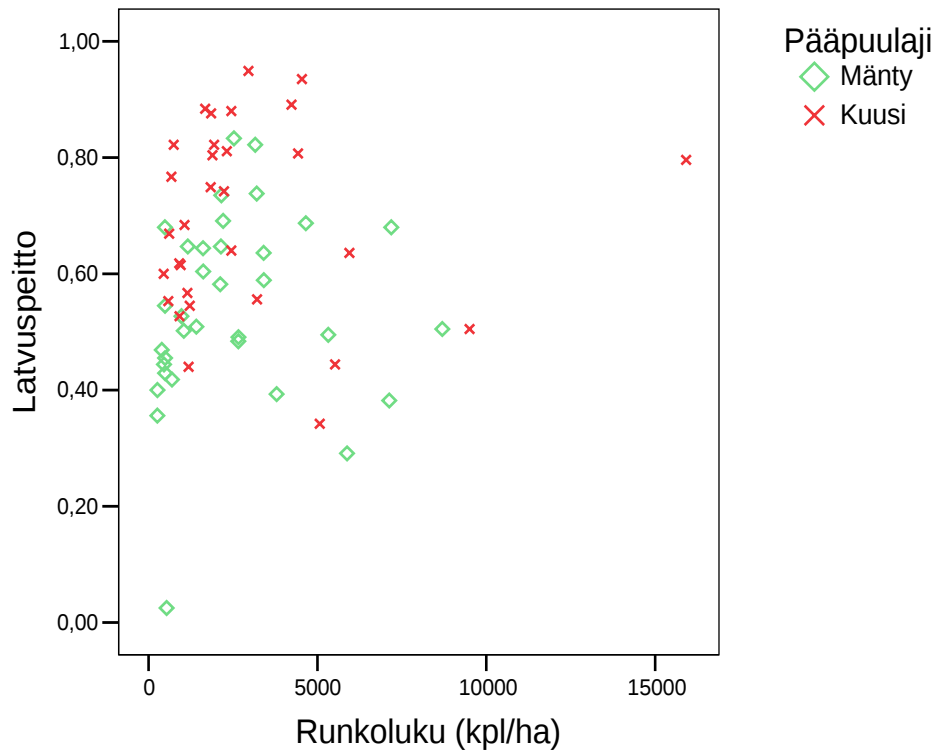
4.1 Latvuspeiton tilastollinen mallinnus

4.1.1 Latvuspeiton riippuvuus eri selittäjistä

Yksittäisistä selittäjistä voimakkaimmin latvuspeiton kanssa korreloivat koealan kokonaispohjapinta-ala (kuva 13) ja yli 12-senttisten puiden yhteenlaskettu runkoluku. Yli 12-senttisten puiden runkoluvusta ei kuitenkaan ole hyötyä pienikokoisten puustojen latvuspeiton ennustamisessa, eikä tätä suuretta muutenkaan usein mitata, joten sitä ei hyödynnetty mallinnuksessa. Myös latvuspeitolla ja kokonaisrunkoluvulla on selvä, joskin epälineaarinen riippuvuus (kuva 14), jota mallinnuksessa voitiin hyödyntää.

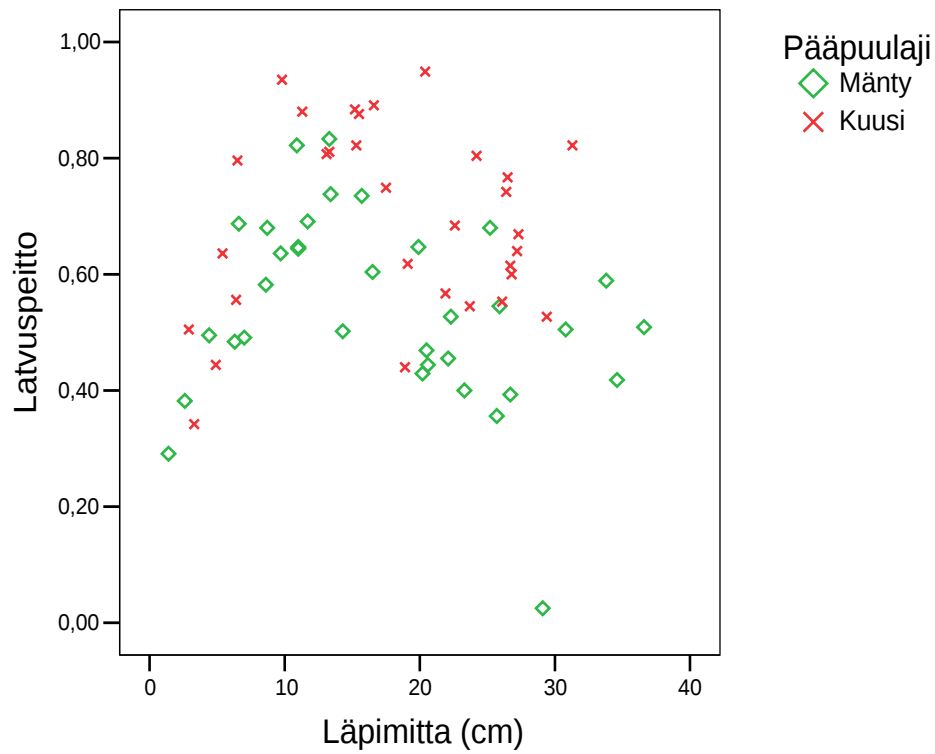


Kuva 13. Latvuspeiton riippuvuus pohjapinta-alasta puulajeittain. Riippuvuus on selkeä, mutta selvästi epälineaarinen.

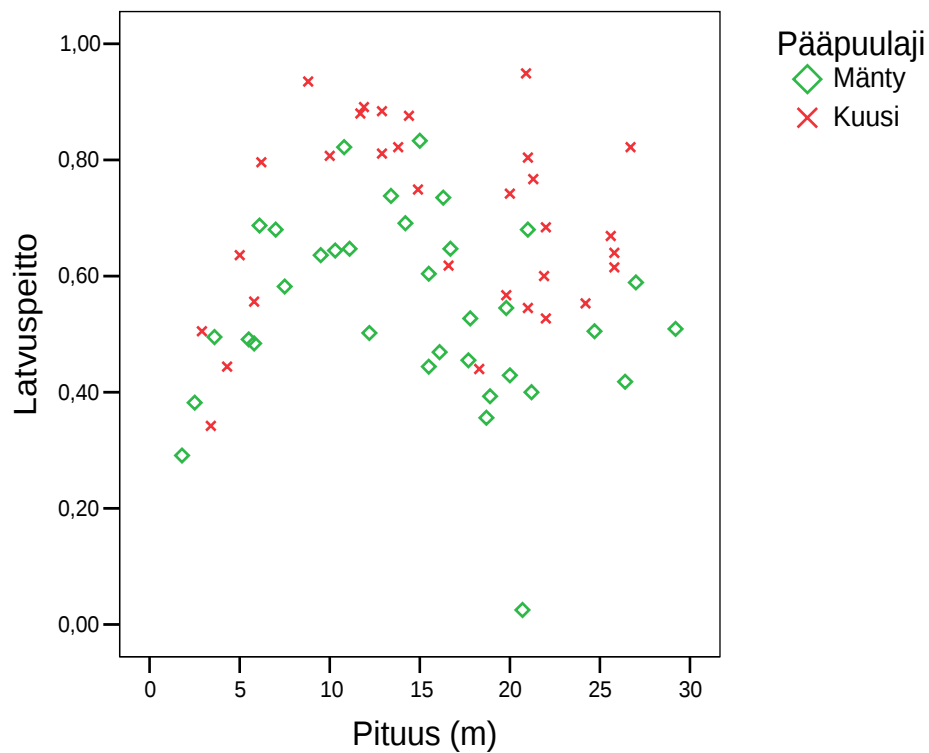


Kuva 14. Latvuspeiton riippuvuus runkoluvusta vastaa muodoltaan kolmannen asteen funktion kuvaaja. Tosin ilman poikkeavaa havaintoa muoto vastaisi paremmin toisen asteen funktiota.

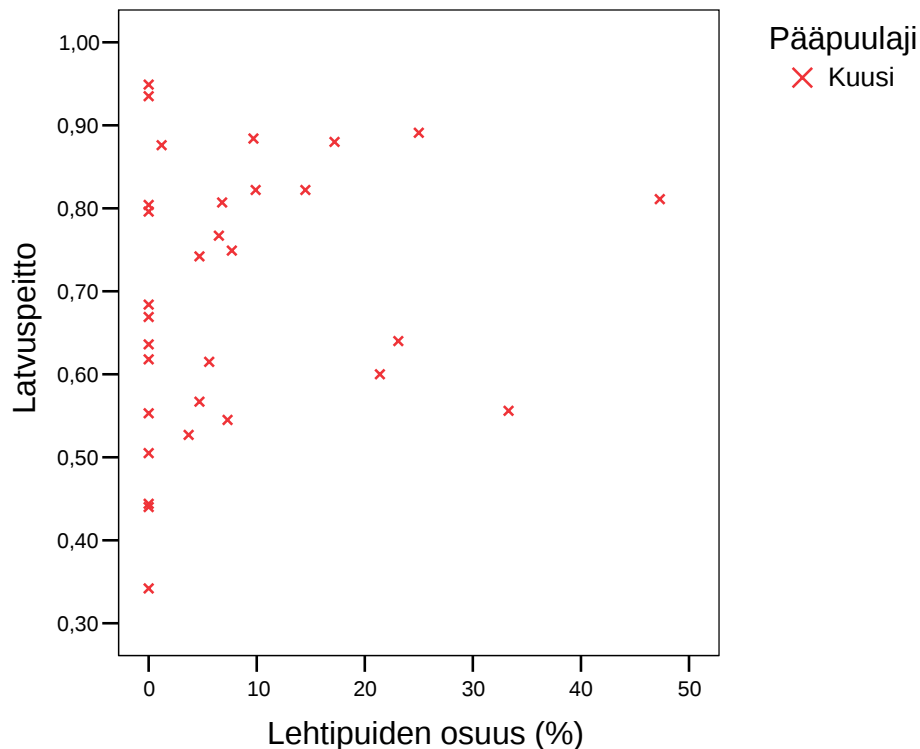
Myös latvuspeiton sekä koealan pääpuulajin läpimitan ja pituuden välillä oli voimakas epälineaarinen riippuvuus (kuvat 15 ja 16). Läpimitan ja pituuden välillä oli myös voimakas lineaarinen korrelaatio (0,97), joten näistä oli järkevintä käyttää mallinnuksessa vain toista, riippuen siitä kumpi sopi malliin paremmin. Kuusi-aineistossa myös latvuspeiton ja lehtipuiden yhteenlasketun osuuden (kokonais-pohjapinta-alasta) välillä oli heikko epälineaarinen riippuvuus (kuva 17).



Kuva 15. Latvuspeiton riippuvuus läpimitasta puulajeittain vastaa muodoltaan toisen asteen funktion kuvaajaa.



Kuva 16. Latvuspeiton riippuvuus pituudesta on samankaltainen kuin riippuvuus läpimitasta.



Kuva 17. Latvuspeiton riippuvuus lehtipuiden osuudesta kuusiaineistossa muistuttaa hieman toisen asteen funktion kuvaajaa, mutta on erittäin heikko.

4.1.2 Yhden selittäjän mallit

Mallinnus suoritettiin alusta alkaen pohjapinta-alaan perustuen, sillä koelan kokonaispohjapinta-alaan korrelaatio latvuspeiton suhteen oli selvä (kuva 13) ja pohjapinta-alaan perustuvia malleja on laadittu jo aiemmin (Kuusipalo 1985, Mitchell & Popovich 1997). Kokeillut mallit tunnuslukuineen on esitetty kaavoissa 8-9 ja taulukossa 1. Käytetyt lyhenteet: CC = latvuspeitto (sadasosina) ja G = pohjapinta-ala (m^2/ha).

Taulukko 1. Pohjapinta-alaan perustuvien latvuspeittomallien tunnuslukuja. Pohjapinta-ala ei yksinäisenä selittäjänä toiminut kovinkaan hyvin.

Yhteenveto			Residuaalit				
Malli	Pääpuulaji	Selittäjät	R^2	Sov. R^2	Keskivirhe	Minimi	Maksimi
1	Mänty	G, G^2	0,474	0,440	0,121	-0,238	0,204
2	Kuusi	G, G^2	0,438	0,398	0,125	-0,200	0,234

$$\text{Malli 1 (mänty): } CC = 0,229 + 0,268G - 0,000400G^2 \quad (8)$$

$$\text{Malli 2 (kuusi): } CC = 0,472 + 0,0104G - 4,04 \times 10^{-6} G^2 \quad (9)$$

Selitysasteet ja keskivirheet eivät näissä malleissa olleet tyydyttäviä, ja ennusteiden suurimmat poikkeamat mitatuista arvoista ovat yli 20 prosenttiyksikköä. Pohjapinta-ala ei siis yksinäisenä selittäjänä riitä tyydyttävien latvuspeittoestimaattien tuottamiseen.

4.1.3 Kahden selittäjän mallit

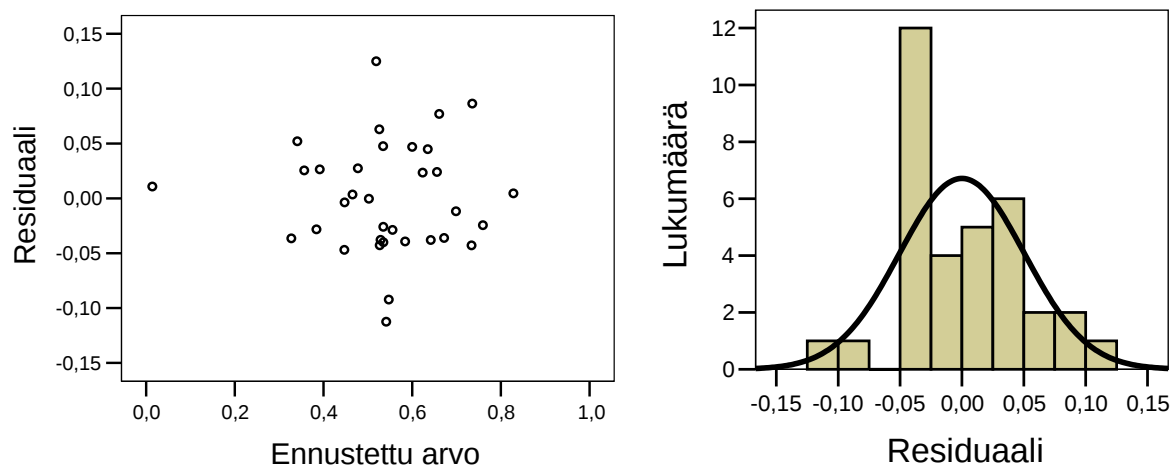
Seuraavassa vaiheessa malliin lisättiin selittäjiksi pohjapinta-alan ja sen potenssin lisäksi pääpuulajin läpimitta tai pituus. Parhaan lopputuloksen antaneet mallit on esitelty taulukossa 2, kaavoissa 10-11 ja kuvissa 18–19. Käytetyt lyhenteet: D = läpimitta (cm), H = pituus (m).

Taulukko 2. Pohjapinta-alaan ja läpimittaan tai pituuteen perustuvien latvuspeitto-mallien tunnuslukuja. Toisen selittäjän lisääminen paransi malleja selvästi.

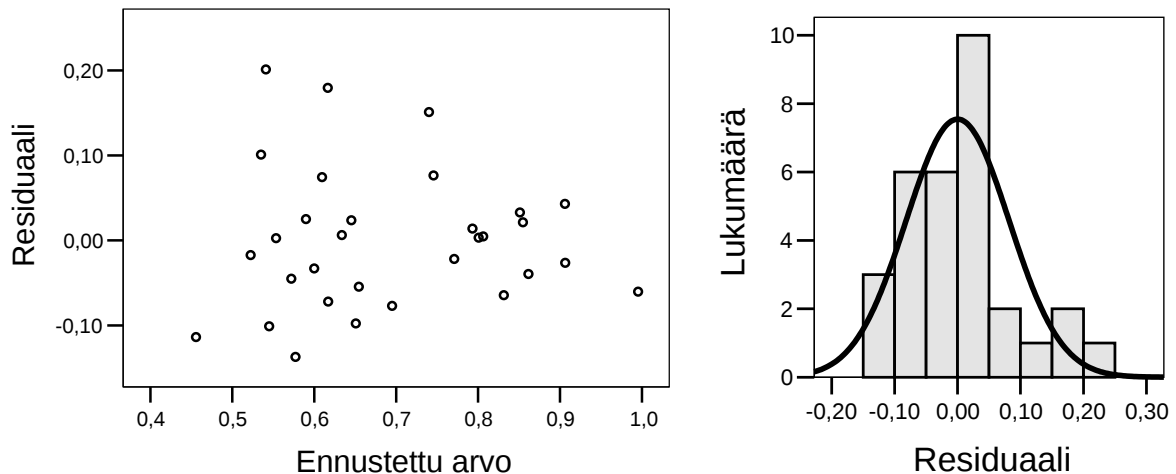
Yhteenveto					Residuaalit		
Malli	Pääpuulaji	Selittäjät	R ²	Sov. R ²	Keskivirhe	Minimi	Maksimi
3	Mänty	G, G ² , D	0,903	0,893	0,0530	-0,112	0,125
4	Kuusi	G, G ² , H	0,741	0,712	0,0864	-0,137	0,201

$$\text{Malli 3 (mänty): } CC = 0,335 + 0,0320G - 3,21 \times 10^{-4} G^2 - 0,0124D \quad (10)$$

$$\text{Malli 4 (kuusi): } CC = 0,486 + 0,0300G - 2,75 \times 10^{-4} G^2 - 0,0177H \quad (11)$$



Kuva 18. Mallin 3 (mänty, 2 selittäjää) residuaalikuvio ja residuaalien histogrammi.



Kuva 19. Mallin 4 (kuusi, 2 selittäjää) residuaalikuvio ja residuaalien histogrammi.

Mäntyaineistolle parhaaksi osoittautui malli 3, jossa selittäjinä olivat pohjapinta-ala ja sen toinen potenssi sekä läpimitta. Myös läpimitan toista potenssia kokeiltiin selittäjänä, mutta sen mukaanotto heikensi hieman mallia. Keskivirhe 0,053 prosenttiyksikköä oli erittäin hyvä, ja suurin ero mitatun ja ennustetun latvuspeiton välillä (12 prosenttiyksikköä) oli myös selvästi parempi kuin pelkkää pohjapinta-alaa selittäjänä käyttävissä malleissa. Mallin residuaalikuvio oli varsin tasainen, vaikka joitakin poikkeamia löytyikin; suurimmat poikkeamat ovat n. 50 %:n latvuspeiton metsiköissä, mikä on tyypillistä kun selitettävänä on prosenttiosuus. Residuaalien histogrammi oli lähes normaalin, mutta 2,5-6 prosenttiyksikön aliarvioita oli huomiota herättävän runsaasti, mikä teki jakaumasta hieman vinon. Tätä ongelmaa ei kuitenkaan saatu korjattua ilman selitysasteen ja keskivirheen heikentymistä.

Kuuselle parhaan mallin muoto oli sama kuin männylle, mutta läpimitan sijasta kolmanneksi selittäjäksi valikoitui pituus (kaava 11). Selitysaste ja keskivirhe olivat selvästi heikompia kuin männyn malleissa, ja residuaalien hajonta oli suurempi. Muodoltaan residuaalijakauma oli kohtalaisen hyvä, mutta mallia vaivasi pieni heteroskedastisuus, koska residuaalien hajonta oli pienillä ennustetun latvuspeiton arvoilla suurempi kuin suurilla. Toisaalta suurimmat poikkeamat osuivat latvuspeitoltaan n. 50 %:n metsiköihin kuten männyn mallissakin, eikä malli juurikaan ennustanut tätä pienempiä arvoja, vaikka muutamia tällaisia koealoja aineistossa olikin (kuva 10). Suurimmat virheet ennustettujen ja todellisten latvuspeiton arvojen välillä olivat jopa 20 prosenttiyksikköä. Myöskään residuaalien jakauma ei ollut aivan

normaalinen, vaan histogrammissa näkyi samantapainen piikki kuin männyllä, vaikka muoto olikin hieman parempi.

4.1.4 Useamman selittäjän mallit

Kun malleihin lisättiin selittäjäksi myös runkoluku, molemmat mallit paranivat vielä hieman. Männyn malli parani jo todellisen runkoluvun lisäämisellä, mutta parannus oli vielä suurempi, kun käytettiin vain 0-12 cm paksujen puiden runkolukua (ja sen toista ja kolmatta potenssia) sekä vaihdettiin selittäjänä ollut läpimitta toiseksi potenssiksi (taulukko 3, kaava 12, kuva 20). Kuusen mallia paransivat eniten kokonaisrunkoluvun sekä koivun ja muiden lehtipuiden osuuden (toisine potensseineen) lisääminen (taulukko 3, kaava 13, kuva 21). Käytetyt lyhenteet: N = runkoluku (kpl/ha), N_{0-12} = runkoluku läpimittaluokissa 0-12 cm (kpl/ha), P_l = lehtipuiden osuus (sadasosina).

Taulukko 3. Usean selittäjän latvuspeittomallien tunnuslukuja. Malleja saatiin edelleen hieman parannettua lisäämällä selittäjiksi pohjapinta-alan ja läpimitan tai pituden lisäksi runkoluku ja kuusella lehtipuiden osuus koealalla.

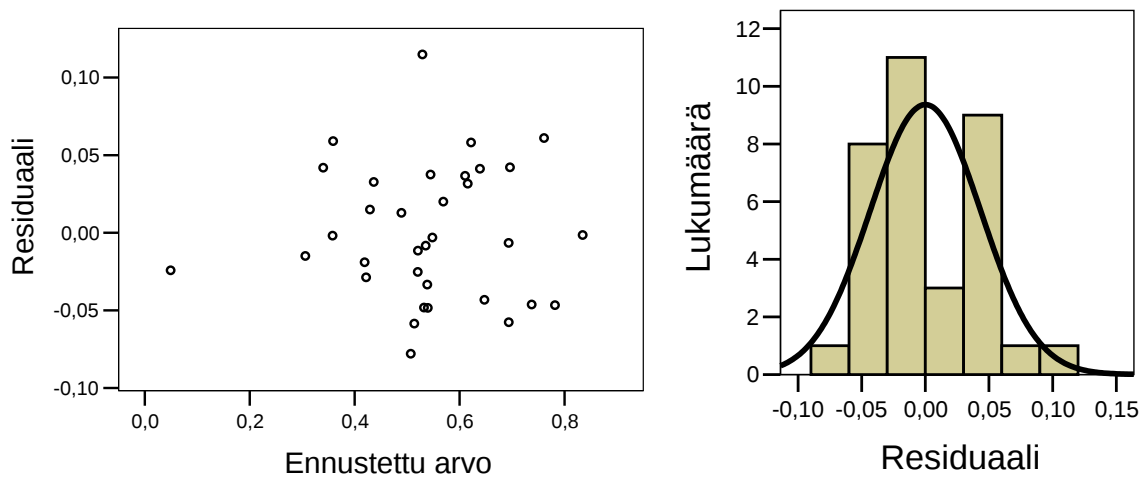
Malli	Pääpuulaji	Yhteenveto			Residuaali		
		Selittäjät	R^2	Sov. R^2	Keskivirhe	Minimi	Maksimi
5	Mänty	G, G^2, D^2, N, N^2, N^3	0,928	0,912	0,0480	-0,078	0,115
6	Kuusi	$G, G^2, D^2, N, N^2, N^3, P_l, P_l^2$	0,844	0,788	0,0742	-0,123	0,157

Malli 5 (mänty):

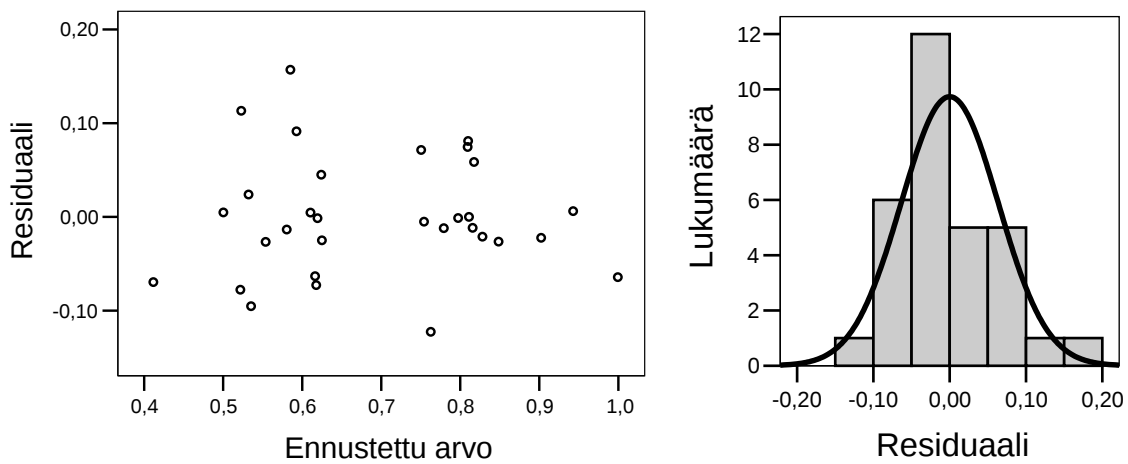
$$CC = 0,205 + 0,0276G - 0,000228G^2 - 0,000263D^2 + 7,12 \times 10^{-5}N - 1,51 \times 10^{-8}N^2 + 9,65 \times 10^{-13}N^3 \quad (12)$$

Malli 6 (kuusi):

$$CC = 0,171 + 0,0320G - 3,30 \times 10^{-4}G^2 - 0,00882H + 8,87 \times 10^{-5}N - 1,02 \times 10^{-8}N^2 + 3,97 \times 10^{-13}N^3 + 0,242P_l - 0,372P_l^2 \quad (13)$$



Kuva 20. Mallin 5 (mänty, 3 selittäjää) residuaalikuvio ja residuaalien histogrammi.



Kuva 21. Mallin 6 (kuusi, 4 selittäjää) residuaalikuvio ja residuaalien histogrammi.

Mallien parannus näiden selittäjien lisäämisen jälkeen ei ollut yhtä suuri kuin läpimitan lisäämisen jälkeen, mutta kuitenkin selvä. Erityisesti suurimmat residuaalit pienenivät molemmilla puulajeilla. Kuusen mallissa puolestaan residuaalien heteroskedastisuus väheni hieman ja muoto muuttui samankaltaiseksi kuin männyn mallissa. Erityisesti lehtipuiden osuuden lisääminen kuusen malliin kannatti, vaikka mallin estimoitavien parametrien määrä kasvoikin kahdeksaan.

4.1.5 Menetelmien vertailua varten laaditut mallit

Menetelmien vertailua varten mallit sovitettiin uudestaan (käyttäen vain ympyräkoealojen latvuspeittoa) aineistoon, josta vertailukoealat oli poistettu, ja ennustettiin näin saaduilla malleilla latvuspeittoestimaatit vertailukoealoille (luku 3.3.2). Mallit 7 ja 8 vastaavat luvussa 4.1.3 esitettyjä malleja. Mallit 9 ja 10 ovat muuten samoja kuin 7 ja 8, mutta selittäjänä käytettävä pohjapinta-alana käytettiin viiden relaskoopikoealan painotetun keskiarvon sijasta vain koealan keskeltä mitattua pohjapinta-alaa; näin tilanne pyrittiin saamaan enemmän todellista inventointia muistuttavaksi. Mallit 11 ja 12 vastaavat puolestaan luvun 4.1.4 parhaimmin aineistoon sopineita usean selittäjän malleja. Uudelleensovitettujen mallien esittely on esitelty taulukossa 4 ja kaavoissa 14–19. Lyhenteet: G_k = vain keskeltä mitattu pohjapinta-ala.

Taulukko 4. Menetelmien vertailussa käytettyjen uudelleensovitettujen mallien tunnuslukuja.

Malli	Pääpuulaji	Yhteenveto		r^2	Sov. r^2	Keskivirhe	RMSE	Residuaalit	
		Selittäjät						Minimi	Maksimi
7	Mänty	G, G^2, D		0,905	0,891	0,0541	0,081	-0,103	0,109
8	Kuusi	G, G^2, H		0,784	0,748	0,0762	0,112	-0,139	0,163
9	Mänty	G_k, G_k^2, D		0,811	0,783	0,0763	0,085	-0,116	0,138
10	Kuusi	G_k, G_k^2, H		0,739	0,695	0,0838	0,122	-0,136	0,176
11	Mänty	$G, G^2, D^2, N_{0-12}, N_{0-12}^2, N_{0-12}^3$		0,949	0,931	0,0431	0,098	-0,061	0,085
12	Kuusi	$G, G^2, H, N, N^2, N^3, P_I, P_I^2$		0,851	0,759	0,0745	0,327	-0,119	0,102

$$\text{Malli 7 (mänty): } CC = 0,328 + 0,0332G - 3,91 \times 10^{-4} G^2 - 0,0119D \quad (14)$$

$$\text{Malli 8 (kuusi): } CC = 0,511 + 0,0253G - 2,04 \times 10^{-4} G^2 - 0,0150H \quad (15)$$

$$\text{Malli 9 (mänty): } CC = 0,303 + 0,0352G - 5,54 \times 10^{-4} G^2 - 0,00993D \quad (16)$$

$$\text{Malli 10 (kuusi): } CC = 0,527 + 0,0252G - 2,23 \times 10^{-4} G^2 - 0,0154H \quad (17)$$

Malli 11 (mänty):

$$CC = 0,215 + 0,0269G - 2,15 \times 10^{-4} G^2 - 2,89 \times 10^{-4} D^2 + 7,44 \times 10^{-5} N - 1,96 \times 10^{-8} N^2 + 1,60 \times 10^{-12} N^3 \quad (18)$$

Malli 12 (kuusi):

$$CC = 0,320 + 0,0227G - 1,86 \times 10^{-4} G^2 - 0,00891H + 9,84 \times 10^{-5} N - 1,40 \times 10^{-8} N^2 + 5,34 \times 10^{-13} N^3 + 0,332P_l - 1,339P_l^2 \quad (19)$$

Mallin 12 korkean RMSE:n (kaava 7) selittää osittain se että kontrolliaineistossa koealoja, joille RMSE laskettiin, oli vain yhdeksän, kun taas selittäjiä oli peräti kahdeksan. Samaa ilmiötä on havaittavissa myös mallissa 11. Kuitenkin myös yleisesti ottaen mallit toimivat kontrolliaineistossa heikommin sovitusaaineistossa. Mallien vertailuarvot muihin menetelmiin nähden laskettiin vertailukoealoille käyttäen pääpuulajista riippuen joko männyn tai kuusen mallia. Luvussa 4.2.7, jossa näillä malleilla saatuja tuloksia vertaillaan muihin menetelmiin, ”pieni malli” vastaa malleja 7-8, ”vain keskeltä mitattu ppa -malli” malleja 9-10 ja ”iso malli” malleja 11–12.

Kuva 22. Boxplot-kuvio eri menetelmien ja sovellustapojen erotuksista Cajanuksen putkeen verrattuna. Poikkeavat havainnot on merkitty vastaavalla koealanumerolla. Menetelmät vasemmalta: Cajanuksen putki 102, 49 ja 23 pisteen hiloilla, densiometri 49, 23 ja 9 pisteen hiloilla ja 10 pisteen subjektiivisella otannalla, LIS, mittaajan sekä kahden ryhmänjohtajan silmävaraiset arviot, digikuvat ja mustatut digikuvat sekä luvussa 4.1.5 kuvatut ”pieni” malli, ”vain keskeltä mitattu ppa” -malli ja ”iso” malli.

Taulukko 5. Eri menetelmien erotusten tunnuslukuja Cajanuksen putkella 195 pistettä käyttäen (sadasosina) mitattuihin tuloksiin verrattuna. Negatiivinen etumerkki tarkoittaa aliarvioita.

Menetelmä	N	Keski-arvo	Keskiarvon keskivirhe	Mediaani	Keski-hajonta	Kvartiili-väli	Ala-kvartiili	Ylä-kvartiili	Minimi	Maksimi
Cajanus 102	19	0,004	0,004	0,007	0,015	0,015	-0,001	0,014	-0,034	0,030
Cajanus 49	19	-0,029	0,021	0,011	0,094	0,106	-0,074	0,032	-0,277	0,079
Cajanus 23	19	-0,055	0,027	-0,022	0,117	0,099	-0,073	0,026	-0,339	0,060
Densio 49	19	-0,001	0,022	0,017	0,097	0,094	-0,038	0,056	-0,300	0,150
Densio 23	19	-0,013	0,025	0,023	0,111	0,126	-0,074	0,052	-0,338	0,155
Densio 9	19	-0,019	0,027	-0,025	0,119	0,146	-0,066	0,080	-0,338	0,173
Densio 10 subj.	19	-0,056	0,019	-0,035	0,081	0,113	-0,107	0,006	-0,255	0,055
LIS	19	-0,003	0,006	-0,006	0,026	0,038	-0,025	0,013	-0,053	0,040
Mittaajan arvio	14	0,008	0,021	0,001	0,080	0,136	-0,057	0,080	-0,132	0,137
Rj. A arvio	19	-0,064	0,020	-0,042	0,089	0,152	-0,158	-0,006	-0,248	0,085
Rj. B arvio	19	-0,162	0,024	-0,178	0,104	0,117	-0,219	-0,102	-0,362	0,065
Digikuva	18	-0,143	0,033	-0,101	0,140	0,212	-0,237	-0,025	-0,407	0,099
Digikuva must.	18	-0,004	0,029	0,020	0,123	0,144	-0,067	0,077	-0,277	0,161
Pieni malli	19	0,008	0,018	-0,011	0,080	0,115	-0,041	0,074	-0,144	0,147
Malli kesk. ppa	19	-0,016	0,020	-0,021	0,087	0,144	-0,078	0,066	-0,177	0,161
Iso malli	19	-0,008	0,020	0,007	0,089	0,114	-0,076	0,038	-0,203	0,182

Tarkimpia olivat Cajanuksen putkella mitattu 102 pisteen hila ja LIS-menetelmä, joiden tulokset poikkeavat kontrollista keskimäärin alle prosenttiyksikön, ja pahimmillaankin vain viisi prosenttiyksikköä. Myös suurin osa muista tapauksista antoi harhattomia tuloksia niin keskiarvon kuin mediaaninkin perusteella tarkasteltuna. Eniten Cajanuksen putkella mitatuista arvoista poikkesivat ryhmänjohtaja B:n silmävarainen arvio ja mustaamattomilta digikuvilta määritetty latvuspeittoestimaatti.

Myös kvartiilivälit olivat eri menetelmillä hyvin erilaisia; lyhimmat välit ovat 102 pisteen Cajanuksen putkella ja LIS-menetelmällä, kun taas selvästi pisin väli on mustaamattomilla digikuvilla. Keskihajonnat ovat samansuuntaisia; digikuvien suuri hajonta selittyy kuvien vähäisellä määrällä (vain 5 kpl/koeala), kun taas muista yli 10 prosenttiyksikön hajontoja tuottaneista menetelmistä silmävaraisten havaintojen epätasaisuus oli odotettavissa ja harvojen densiometri- ja Cajanuksen putki -hilojen suuri hajonta selittyy poikkeavien havaintojen suurella määrällä. Boxplot-kuviossa poikkeavina havaintoina näkyivät useimmin koealat 40 ja 56, jotka olivat edellä mainitut kaksi lyhyttä kuusen taimikkoa. Näissä mittaus densiometrillä rinnan- korkeudelta ei toiminut ollenkaan, eikä Cajanuksen putkella tehty harva otanta kyennyt löytämään kaikkia puita.

Mielenkiintoista oli myös se, että useimmat menetelmät tuottivat tässä aineistossa aliarvioita. Edes etukäteen yliarvioita tuottaviksi ajatellut mustatut digikuvat ja densiometri eivät tuottaneet mediaanien avulla tarkasteltuna muutamaa prosenttiyksikköä suurempia yliarvioita. Toki yksittäisiltä koealoilta löytyi myös selviä yliarvioita, mutta kokonaisuutena merkittävistä yliarvioista ei ole näyttöä.

Havaittujen erojen tilastollista merkitsevyyttä testattiin epäparametrisen Kruskal-Wallis varianssianalyysin ja monivertailujen avulla (taulukot 6 ja 7).

Taulukko 6. Kruskal-Wallis -varianssianalyysin testisuure. Nollahypoteesi oli, ettei menetelmien välillä ole eroja. Nollahypoteesi hylättiin testissä selvästi, minkä osoittaa pieni p-arvo.

Kruskal-Wallis testi populaatioiden mediaaneille	
χ^2	59,476
Vapausasteet	16
P-arvo	$6,41 \times 10^{-7}$

Taulukko 7. Monivertailu. Kriittistä arvoa itseisarvoltaan suuremmat testisuureen arvot (lihavoitu) poikkeavat 5 %:n merkitsevyydellä kontrollista. Negatiivinen testisuureen arvo tarkoittaa aliarviota.

Menetelmä	n	Järjestys- keskiarvo	Erotus kontrolliin	Keskivirhe	Kriittinen arvo	Testi- suure
Cajanus 195 (kontrolli)	19	182,0	0,0	14,821	2,955	0,000
Cajanus 102	19	193,5	11,5	14,821	2,955	0,778
Cajanus 49	19	165,9	-16,1	14,821	2,955	-1,083
Cajanus 23	19	144,3	-37,7	14,821	2,955	-2,546
Densiometri 49	19	196,5	14,5	14,821	2,955	0,980
Densiometri 23	19	188,2	6,2	14,821	2,955	0,421
Densiometri 9	19	167,3	-14,7	14,821	2,955	-0,991
Densiometri 10 subj.	19	125,3	-56,7	14,821	2,955	-3,826
LIS	19	176,7	-5,3	14,821	2,955	-0,359
Mittajaajan arvio	14	187,3	5,3	15,905	2,955	0,335
Rj. A arvio	19	120,7	-61,3	14,821	2,955	-4,139
Rj. B arvio	19	58,9	-123,1	14,821	2,955	-8,308
Digikuva	18	78,1	-103,9	15,020	2,955	-6,917
Digikuva mustattu	18	189,7	7,7	15,020	2,955	0,514
Pieni malli	19	190,2	8,2	14,821	2,955	0,554
Malli vain kesk. ppa	19	161,8	-20,2	14,821	2,955	-1,362
Suurin malli	19	173,0	-9,0	14,821	2,955	-0,607

Varianssianalyysin tulokset vahvistivat aineistosta päällisin puolin tehdyt havainnot: nollahypoteesi ”menetelmien välillä ei ole eroa” hylättiin χ^2 -testissä selvästi. Monivertailussa tilastollisesti merkitsevät erot Cajanuksen putkeen nähden löytyivät molempien ryhmänjohtajien silmävaraisista arvioista, mustaamattomista digikuvista

ja subjektiivisesta kymmenen pisteen densiometrimittauksesta. Kaikki tilastollisesti merkitsevät erot olivat aliarvioita. Suurimman yliarvion tuottanut densiometri-mittauskin jäi kauas kriittisestä arvosta, vaikka poikkeavat havainnot kuusen taimikoista eivät tähän testiin kovin voimakkaasti vaikuttaneetkaan.

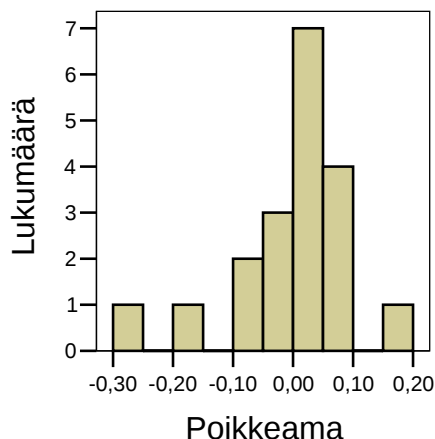
4.2.2 Cajanuksen putki ja LIS-menetelmä

Perusmenetelmänä käytetyn Cajanuksen putken antamat tulokset olivat tarkkoja, kun otantakoko oli riittävän suuri. Tämän tutkimuksen perusteella n. sata pistettä riittäisi vielä kohtalaisen tarkkaan arvioon, mutta sitä alemmilla pistemäärillä keskivirhe kasvaa selvästi. Tämä tulos oli myös yhdenmukainen Jenningsin ym. (1999) binomikaavan avulla laskeman minimiotoskoon kanssa. Alhaisemmilla piste-tiheyksillä hajonta kasvoi liikaa (n. kymmeneen prosenttiyksikköön), ja varsinkin taimikoissa saattoi tulla selviä latvuspeiton aliarvioita, koska harva otanta ei löytänyt kaikkia puita. Cajanuksen putkella 195 ja sadan pisteen otoksilla saatujen tulosten tarkkuuden vahvasti hyvin pieni ero tarkkuudeltaan vastaavaan LIS-menetelmään.

LIS oli myös erittäin tarkka menetelmä, mahdollisesti jopa Cajanuksen putkea tarkempi, riippuen putkella mitatun hilan tiheydestä. Maksimipoikkeamat 195 pisteen Cajanus-hilaan nähden olivat n. viisi prosenttiyksikköä, jotka nekin tulivat rakenteeltaan epätasaisilla koealoilla; keskimääräinen poikkeama oli vain n. 2,5 prosenttiyksikköä.

4.2.3 Densiometri

49 pisteen densiometrimittaus luvussa 3.3.2 kuvattua muunnosta käyttäen antoi keskimäärin harhattomia tuloksia, jotka ovat myös suhteellisen tarkkoja täyspuustoisilla koealoilla. Menetelmä ei sovellu lyhytpuustoiisiin (alla 5 metriä) taimikoihin, koska lyhyet puut jäävät rinnankorkeudelta mitattaessa helposti löytymättä - tästä seurasi 30 prosenttiyksikön aliarvio lyhyimmällä vertailukoealalla. Vaikka avauskulmasta johtuva yliarvio ei tässä testissä ollut merkitsevä, on kuitenkin huomattavaa että erotuksien jakaumaa (kuva 23) tarkasteltaessa pienien, muutaman prosentin yliarvioiden osuus oli huomattavan suuri.



Kuva 23. Densiometrimittausten poikkeama kontrollista. Muutaman prosentin yliarvioiden osuus on huomattava. Kaksi lyhyttä kuusen taimikkoa erottuvat kahtena poikkeavan suurena aliarviona.

Densiometriotannassa mukana olevien pisteiden vähentäminen 23 ja yhdeksään heikensi tuloksia, sillä kvartiilivälit ja keskihajonnat kasvoivat jonkin verran. Yllättävää oli, ettei 23 ja yhdeksän pisteen mittausten välillä ollut käytännössä ollenkaan eroa.

Subjekttiivisen densiometrimittauksen tulokset olivat vastaavia systemaattisia densiometrimittauksia useammin aliarvioita, jotka olivat myös monivertailussa tilastollisesti merkitseviä. Periaatteessa aliarvioiden olisi pitänyt vähentyä ainakin pienissä taimikoissa, koska taimikoiden mittaus tehtiin nyt maanpinnan tasolta, ja mittaja saattoi huomioida miten suuri osa mittauksista pitäisi tehdä pienten taimien ympäriltä. Maksimialiarvio oli tästä huolimatta kokonaiset 26 prosenttiyksikköä, vaikka keskihajonta hieman pienenikin. Aliarviot selittänee tässä juuri otannan subjektiivisuus: tiheissä metsissä, joissa liikkuminen on hankalaa, mittaja tyytynee helposti kiertämään pahimmat tiheiköt. Näin syntyneet aliarviot kumosivat avauskulmasta johtuvan yliarvion. Koko aineistossa tämän menetelmän keskiarvotulos olikin kuuden prosentin aliarvio. Menetelmä toiminee selvästi paremmin metsiköissä joissa liikkuminen on helppoa, sillä vain mäntyvaltaisia koealoja tutkittaessa saavuttiin muita densiometrimittauksia pienempi hajonta ja käytännössä harhaton keskiarvo.

4.2.4 Digikuvat

Mustaamattomien digikuvien tulokset olivat selviä, tilastollisesti merkitseviä aliarvioita. Menetelmän keskiarvotulos oli viidentoista ja mediaanitulos 10 prosenttiyksikön aliarvio. Aliarvio johtui latvusten sisäisten aukkojen suuresta määrästä erityisesti mäntykoealoilla, jota avauskulmasta syntyvä geometrinen harha ei pystynyt ”korvaamaan” – menetelmä mittaa siis paremmin vaikuttavaa latvuspeittoa. Kuusikkaisilla kuvioilla aliarvio supistui n. 10 prosenttiyksikköön, koska kuuset pidättävät valoa mäntyjä tehokkaammin. Lisäksi koealojen välinen hajonta oli niin suurta, että aliarvio saattoi pahimmillaan olla jopa 40 prosenttia, mutta toisaalta joillakin koealoilla tämäkin menetelmä tuotti yliarvioita. Viisi kuvaa oli siis aivan liian vähäinen määrä luotettavan latvuspeittoarvion saamiseen. Harhaa kasvattavat myös taimikot, joilla ongelma oli sama kuin densiometrillä mitattaessa: kuvat otettiin rinnankorkeudelta, joten pienemmät puut eivät tulleet kuviin mukaan. Kun kaikki taimikot poistettiin aineistosta, aliarvio laski kymmeneen prosenttiin.

Sen sijaan mustattujen digikuvien perusteella lasketut perinteisen latvuspeiton arvot olivat koko aineistossa varsin tarkkoja, erotusten keskiarvo oli käytännössä nolla ja mediaanikin vain kahden prosenttiyksikön yliarvio, eli menetelmä oli käytännössä harhaton. Tämä vaikutti oudolta, koska laajahkon avauskulman menetelmien (tässä avauskulma n. 56 astetta) pitäisi tuottaa latvuspeiton mittauksessa yliarvioita. Jos taimikoita ei huomioitu, tilanne hieman ”normalisoitui” ja mustattujen latvuskuvien keskiarvoksi tuli 4,5 prosenttiyksikön yliarvio. Toki myös hajonta oli edelleen kuvien vähäisen määrän vuoksi suuri, mutta kuitenkin hieman mustaamattomia kuvia pienempi; tämä johtui luultavasti puulajin vaikutuksen vähenemisestä. Koko aineistossa mustattujen digikuvien keskihajonta oli 12 ja ilman taimikkojakin reilut seitsemän prosenttiyksikköä, eli suurempi kuin useimmilla muilla menetelmillä. Kuvien määrän lisääminen ja kameran avauskulman supistaminen luultavasti parantaisivat tuloksia.

4.2.5 Silmävarainen arviointi

Silmävaraisen arvioinnin tulokset olivat odotettuja: kolmen arviointia suorittaneen henkilön välillä oli suuria eroja. Odotusten mukaista oli myös se, että tulokset ovat

aliarvioita; ryhmänjohtaja B:n keskiarvotulos oli 16 ja mediaani peräti 18 prosenttiyksikön aliarvio, kun taas A:n keskiarvotulos oli kuuden ja mediaanitulos neljän prosenttiyksikön aliarvio. Sen sijaan mittaaajan ennen mittaustaan tekemät arviot olivat keskimäärin harhattomia, keskihajonnan ollessa samaa luokkaa kuin ryhmänjohtajilla. Tämä viittaa siihen, että oikeanlaisen koulutuksen avulla silmävaraisen arvioinnin tarkkuutta voidaan merkittävästi parantaa ainakin harhaisuuden osalta, mutta hajonnan minimointi lienee vaikeampaa.

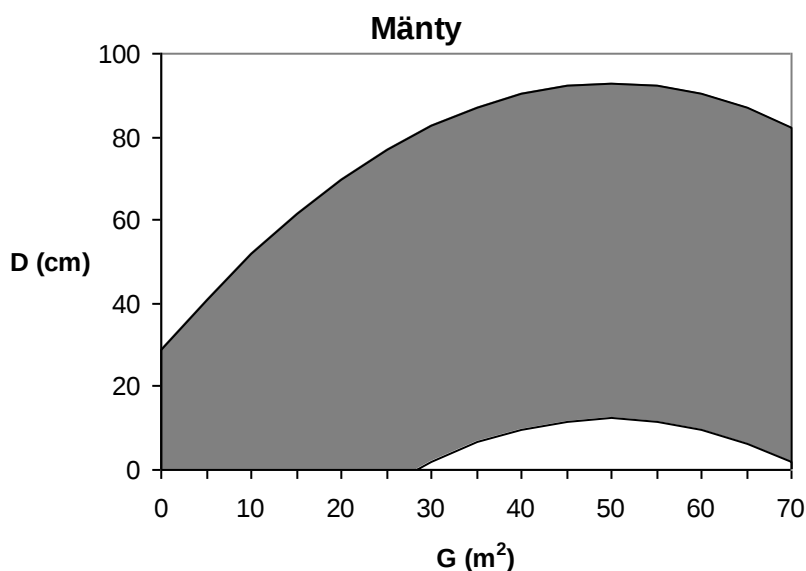
4.2.6 Mallit

Yksinkertainen, tarkkaa pohjapinta-alaa käyttävä ”pieni malli” toimi muihin menetelmiin verrattuna kohtalaisen hyvin. Tulokset olivat käytännössä harhattomia, ja ennusteiden maksimipoikkeama mitatusta arvosta oli 15 ja ennusteiden keskihajonta kahdeksan prosenttiyksikköä. Keskihajonta ei kuitenkaan kerro kaikkea, sillä peräti 15 koealalla poikkeama oli alle kahdeksan prosenttiyksikköä, mutta muilla neljällä (joista kolme oli kuusikkoja) välillä 13–15 prosenttiyksikköä. Mallin toimivuudessa oli siis suuria eroja erityyppisissä metsissä; poikkeava männikkö oli varsin tiheä nuori kasvatusmetsä, ja poikkeaviin havaintoihin kuuluivat myös kaksi kuusen taimikkoa, jotka erottuivat muissakin menetelmissä.

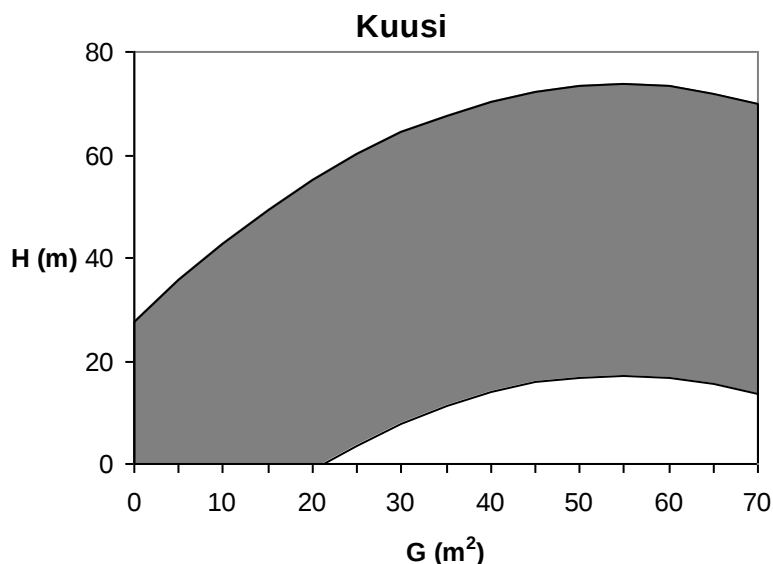
Vain koealan keskeltä mitattua pohjapinta-alaa hyödyntävällä mallilla maksimipoikkeama kasvoi 18 prosenttiyksikköön keskihajonnan pysyessä likimain samana; keskimäärin tulokset olivat parin prosentin aliarvioita. Monivertailussa tämä malli oli kolmesta mallista heikoin. Suurempi poikkeama oli seurausta lisääntyneestä satunnaisvaihtelusta joka johtui ainoastaan keskipisteestä tehdystä pohjapinta-alamittauksesta.

Parhaiten koko aineistoon sopinut ”iso malli” tuotti myös mielenkiintoisia tuloksia: mediaanipohjaisessa tarkastelussa kvartiiliväli oli samansuuruinen kuin pienellä mallilla, mutta keskihajonta oli hieman suurempi. Ero johtui siitä, että minimi- ja maksimipoikkeamat olivat selvästi suurempia kuin pienessä mallissa. Muilla koealoilla mallit toimivat keskimäärin yhtä hyvin. Nämä kaksi poikkeavaa koealaa olivat jälleen kaksi kuusen taimikkoa, joilla runkoluku ja koivun osuus poikkesivat muusta aineistosta, mikä huononsi eniten ison mallin estimaatteja.

Malleja latvuspeiton ennustamiseen käytettäessä tulisi välttää ekstrapolointia, eli malliin ei pitäisi sijoittaa arvoja, jotka ovat suurempia tai pienempiä kuin suurimmat ja pienimmät aineistossa olleet arvot. Jos näin tehdään, mallit voivat antaa harhaisia arvoja, ja jopa ennustaa latvuspeiton olevan alle nolla tai yli sata prosenttia. Samoin voi usean selittäjän mallissa käydä harvinaisilla eri selittäjien yhdistelmillä. Parasta lieneekin käyttää ennustamiseen yksinkertaisempaa ”pientä mallia”, eli männylle mallia jossa selittäjänä ovat pohjapinta-ala ja läpimitta sekä vastaavaa kuusen mallia, jossa läpimitta on korvattu pituudella. Näille malleille on myös laskettu rajat, joiden sisällä pitäydyttäessä mallin antamat tulokset pysyvät nollan ja sadan prosentin välillä (kuvat 24 ja 25). Kuusen kahden selittäjän malli antaa epäkelpoja tuloksia hieman männyn mallia helpommin, mutta käytännössä tilanteet joissa malli ei toimi lienevät harvinaisia.



Kuva 24. Männyn kahden selittäjän mallin kelpoisuusalue (tummennettu). Tumman alueen yläpuolella malli antaa nollaa pienempiä ja alapuolella 100 % suurempia latvuspeittoennusteita.



Kuva 25. Kuusen kahden selittäjän mallin kelpoisuusalue (tummennettu). Tumman alueen yläpuolella malli antaa nollaa pienempiä ja alapuolella 100 % suurempia latvuspeittoennusteita.

Kaiken kaikkiaan mallit eivät tarkkuudeltaan ole verrattavissa tarkkoihin menetelmiin kuten Cajanuksen putki tai LIS, mutta tulokset ovat hieman parempia kuin erilaisilla nopeilla mittausmenetelmillä (densiometri vähin mittauksin, digikuvat) saavutetut tulokset. Tämä tulos on lupaava ajatellen mallinnuksen käyttöä todellisissa inventointihankkeissa.

4.2.7 Menetelmien käytännöllisyys

Eri menetelmien paremmuutta verrattaessa on huomioitava myös niiden käytännöllisyys, eli maastossa suoritettavan mittauksen sekä jälkitöiden helppous ja nopeus. Kuten jo etukäteen tiedettiin, tarkimman tuloksen antavat menetelmät olivat myös kaikista työläimpiä. 275 pisteen Cajanuksen putki -mittaukseen mittanauhan avulla kului aikaa tunnista puoleentoista mitattavasta koealasta riippuen, vaikka linjojen perustamiseen kulunutta aikaa ei huomioitu. Työtä voitiin nopeuttaa jättämällä selvästi latvuksen alle (esim. aivan puun juurelle) jäävät pisteet mittaamatta, mutta siitäkin huolimatta menetelmä on laajamittaiseen inventointiin liian hidas. Mitattavan hilan pistemäärän pienentäminen nopeuttaa työtä, mutta ajanmenekin kertaluokka pysyy samana (edelleen kymmeniä minuutteja).

LIS-menetelmään kulunut aika riippui Cajanuksen putkea enemmän mitattavan metsän rakenteesta: jos puita oli vähän ja ne olivat isoja, eroa ei juuri ollut, mutta jos

putia ja niiden välisiä aukkoja oli paljon (kuten taimikoissa), linjojen mittaamiseen kului todella paljon aikaa.

LIS- ja Cajanuksen putki -menetelmissä rasitteena on myös mukana kuljetettavan kaluston määrän lisääntyminen: Cajanuksen putken ja tarkkuutta lisäävän mittanauhan lisäksi mittausta helpottava tukijalka on tarpeen jatkuvassa työskentelyssä. Toki pistemittauksiin on kehitetty myös muita mittavälineitä, jotka ovat perinteistä putkea keveämpiä (luku 2.1.1). Putken käyttö sadesäällä on myös hankalaa; ainakin tässä työssä käytetyn putken sisään tiivistyi helposti kosteutta, joka esti näkyvyyden putken läpi, ja jota oli vaikea poistaa. Samoin putken päähän kertyvät sadepisarot vaikeuttavat työtä.

Densiometri on kevyt ja helposti mukana kuljetettava laite, jota sadekaani ei häiritse yhtä paljon, sillä peilin pinta on helppo kuivata ennen mittausta. Koealalta mitattavien pisteiden määrää voidaan vähentää kerralla mitatun alan laajetessa, ja myös mittanauha voitiin turvallisesti korvata askelmitalla pisteiden välin kasvettua neljään metriin. 49 pisteen systemaattiseen mittaukseen kului silti aikaa noin puoli tuntia. Aikaa kasvatti se, että yksittäinen mittaus oli nyt monimutkaisempi, kun oli keskityttävä pitämään laite vaakatasossa ja laskettava samalla mielessään neljän eri ruudun peitot yhteen. Nopeana mittausvaihtoehtona testattiin kymmenen pisteen subjektiivista mittausta, johon aikaa kuluu noin 4-5 minuuttia, mutta tuloksien tarkkuudessa oli tätä menetelmää käytettäessä suurta vaihtelua.

Digikameralla yksittäisen kuvan ottamiseen kuluva aika vastasi suunnilleen yhteen densiometrimittaukseen kulunutta aikaa, joskin kuvan ottaminen on toimituksena yksinkertaisempi. Kameran käytön pahin este on erilaisista valaistusoloista johtuva jälkityön suuri määrä: binarisointiin ei toistaiseksi ole ollut käytettävissä kaikissa oloissa toimivaa automaattista menetelmää, joten jokainen kuva on käytävä läpi. Tasaisen pilvisissä ihanneoloissa otettujen kuvien binarisointi onnistuu nopeasti automaattisilla rutiineilla, mutta auringonpaisteessa otettuja kuvia joutuu muokkaamaan käsin joskus voimakkaastikin. Sama pätee mustattuihin digikuviin: mustaamista voisi automatisoida erilaisten hahmontunnistusalgoritmien avulla, mutta lopputuloksen joutunee tarkastamaan joka tapauksessa omin silmin. Ishidan (2004) esittämä automaattisen binarisoinnin menetelmä voi tulevaisuudessa

helpottaa tätä ongelmaa. Kameroiden lyhytaikaista pidempi käyttö sadekelillä on myös käytännössä mahdotonta kosteusongelmien ja linssiin kertyvän veden takia, ellei turvauduta erikoislaitteisiin.

Latvuspeiton silmävarainen arviointi oli menetelmistä nopein; minuutissa koealan ehtii tarkastella melko perusteellisesti. Myöskään mallien käyttö ei vie maastoaikaa, mutta tuloksia joudutaan laskemaan jälkikäteen, ja niiden luotettavuus olisi joka tapauksessa hyvä varmistaa jollakin menetelmällä.

5. TULOSTEN TARKASTELU

Kaiken kaikkiaan saadut tulokset olivat melko lailla odotusten mukaisia. Mallinnus onnistui etenkin männyn osalta jopa paremmin kuin ennalta odotettiin. Viiden prosenttiyksikön keskimääräinen virhe ennusteessa on niin hyvä tulos, että mallin parantaminen edelleen lienee hankalaa, koska satunnaisvaihtelun lähteitä jää aina huomioimatta. On myös muistettava, että aineistoa oli tässäkin tutkimuksessa yksinkertaistettu jättämällä sekametsien osuus mäntyaineistossa hyvin pieneksi ja rajaamalla turvemaat kokonaan pois aineistosta, kuten myös pienet taimikot. Lisäksi mallinnuksen käyttökelpoisuus laajemmin kuin paikallisella tasolla vaatii vielä lisäselvityksiä.

Kuusella mallien toimivuus jäi selvästi heikommaksi kuin männyllä, mikä johtunee ainakin osittain puutteellisesta aineistosta. Etenkin nuoren kasvatusmetsän kuusikoita olisi kaivattu aineistoon enemmän. Monet kuusikkokoealat olivat myös rakenteeltaan varsin heterogeenisiä, sillä tutkimusalueella oli ollut tuulituhoja ja myös harvennuksia oli tehty joitakin vuosia aiemmin, joten koealoille tuli usein mukaan ajouria. Jonkinlaisen aukkojen suhteellista kokoa kuvaavan spatiaalisen indeksin käyttö selittäjänä olisi saattanut kuvata puuston ryhmittäisyydestä johtuvaa eroa latvuspeiton ja pohjapinta-alan välillä (ryhmittyneessä puustossa latvukset menevät helposti limittäin) ja parantaa siten mallia.

Jos latvuspeiton mallinnusta puustotunnusten perusteella halutaan jatkossa edelleen kehittää, on välttämätöntä parantaa aineiston kattavuutta niin määrällisesti kuin laadullisestikin. Myös aineiston maantieteellistä kattavuutta olisi laajennettava ja koealojen paikat valittava mieluummin täysin satunnaisesti, mutta kuitenkin niin että aineistosta tulee riittävän monipuolinen. Mallinnusmenetelmä on sinänsä valmis laajempaankin käyttöön.

Laajemman mallinnusprojektin alkuunsaamiseksi tarvittaisiin kuitenkin ensiksi nopea ja luotettava menetelmä koealan latvuspeiton selvittämiseksi maastossa. Tällainen menetelmä olisi ihanteellinen myös valtakunnan metsien inventoinnin kuviotietoihin kuuluvan latvuspeittoarvion estimointiin, mutta nopeus ja kyky luokitella puustot

latvuspeiton mukaan ovat VMI:n kannalta tärkeämpää kuin täydellinen tarkkuus. Mallinnusta varten sen sijaan tarvitaan tarkka ja virheetön latvuspeittoestimaatti.

Menetelmien vertailussa ilmeni, että nopeuden ja tarkkuuden yhdistäminen on odotetun vaikeaa. Cajanuksen putki ja LIS-menetelmä soveltuvat hyvin tarkan latvuspeiton mittaamiseen, jos aikaa on käytettävissä tarpeeksi, mutta hitaus rajoittaa niiden käyttöä VMI:n tapaisissa inventoinneissa. Densiometristä tulee tässä tutkimuksessa esitetyn muunnoksen avulla varttuneissa puustoissa tarkkuudeltaan käyttökelpoinen väline, mutta pisteverkon on oltava kohtalaisen tiheä (riippuen vaaditusta tarkkuustasosta). Metsiköissä, joissa tiheys ei ole ongelma, myös subjektiivinen densiometriotanta lieenee käyttökelpoinen. Etenkin jos mittauksia on aikaa tehdä enemmän kuin tässä tutkimuksessa tehdyt kymmenen kappaletta, latvuspeitosta saataneen densiometrilläkin riittävän hyvä estimaatti. Densiometri ei kuitenkaan millään otanta-asetelmalla sovellu kovin hyvin taimikoissa käytettäväksi. Myös digikameraa voi tarvittaessa käyttää (perinteisen) latvuspeiton arviointiin, mutta latvukset on ehdottomasti mustattava jollain menetelmällä. Toisaalta parempiakin vaihtoehtoja mittaukseen löytynee, joten kameraa kannattaa käyttää vain jos ollaan kiinnostuneita myös vaikuttavasta latvuspeitosta tai latvuksen valonläpäisevyydestä.

Jos mittaus halutaan tehdä todella nopeasti ja tarkkuusvaatimuksesta hieman tingitään, silmävarainen arviointi on käyttökelpoinen menetelmä havaitsijoiden koulutuksen jälkeen. Valtakunnan metsien inventointiin, jossa jo viiden minuutin mittausaika on nykyisin resurssein liian pitkä latvuspeitolle uhrattavaksi, paljain silmin tehtävä arviointi säilynee jatkossakin ainoana vaihtoehtona mallien käytön ohella. Ryhmänjohtajien koulutukseen on kuitenkin tällöin kiinnitettävä erityistä huomiota. Tarvittaessa arvioinnin apuna ja tukena puustoltaan tasaisilla kuvioilla voidaan myös käyttää suuntaa-antavia pohjapinta-alan ja keskiläpimitan tai latvuksen läpimitan pohjalta laadittuja latvuspeittotaulukoita. Arvioijan on kuitenkin itse tunnistettava milloin taulukon arvoon voi luottaa ja uskallettava tarvittaessa korjata taulukon arvoa suuntaan tai toiseen. Näiden keinojen avulla silmävaraisesta arvioinnista voidaan luultavasti kehittää VMI:n tarpeisiin riittävä menetelmä. Lisäksi tulosten tarkistusmittaus ja arvioijien ”silmän” säännöllinen tarkkailu on sisällytettävä kiinteäksi osaksi inventointia.

Mallien käyttö latvuspeiton estimoinnissa vaatii vielä runsaasti lisätutkimusta. Tämän työn tulosten perusteella yksinkertaiset mallit soveltuvat kohtalaisen hyvin täydentämään muita mittausmenetelmiä, jos latvuspeittoarvioksi riittää suuntaa-antava tulos, eikä keskimääräinen 5-8 prosenttiyksikön virhe ole ratkaiseva. Tarkempia tuloksia haluttaessa joudutaan edelleen turvautumaan maastomittauksiin, sillä mallit eivät missään tapauksessa pysty selittämään latvuspeittoa täydellisesti, vaan tuloksiin jää aina satunnaista vaihtelua. Tilastollinen mallinnus lienee kuitenkin lähitulevaisuudessa tärkein menetelmä niin latvuspeiton kuin yleisemminkin metsän rakenteen kuvaamiseen. Suoraan koealan puustotunnuksiin perustuvia arvioita tarkempia tuloksia voidaan mahdollisesti saavuttaa yksittäisen puun latvuksen läpimittaan perustuvien mallien avulla (Gill ym. 2000, Williams ym. 2003). Tällöin olisi kuitenkin tunnettava myös yksittäisten puiden sijainnit koealoilla, ja lisäksi latvuksen läpimitta pitäisi mitata tai estimoida luotettavasti.

Valtakunnallisesti pätevien latvuspeittomallien laadinta edellyttää, kuten jo aiemmin todettiin, suuren latvuspeittoaineiston keräämistä. Tällaisessa aineistossa tulosten on oltava harhattomia, joten latvuspeiton mittaus olisi syytä tehdä joko Cajanuksen putken tai LIS-menetelmän avulla. Tämä vaatisi joka tapauksessa runsaasti aikaa ja resursseja, mutta maastomittausta voitaneen jonkin verran nopeuttaa valitsemalla mittausasetelma sellaiseksi, ettei ainakaan koealan perustamiseen kulu kovin runsaasti aikaa; esimerkiksi koealan keskusta laidoille päin suunnattujen linjojen mittaus voisi olla sopiva keino. Tehtävää helpottaisi myös Cajanuksen putken kehittäminen nykyistä keveämmäksi ja käytännöllisemmäksi, ehkä jopa laitteeseen sulautetun elektroniikan avulla.

Modernit kaukokartoitusmenetelmät saattavat tulevaisuudessa osoittautua selvästi parhaaksi tavaksi määrittää latvuspeittoa; tuntuuhan ylhäältä käsin tehtävä mittaus jo ajatuksen tasollakin luontevammalta kuin työläs latvuston kartoitus maan pinnalta. Satelliittikuvilta tehtävät latvuspeittoarviot ovat kuitenkin vielä Suomen olosuhteissa liian epätarkkoja, ja korkean resoluution materiaalien (digitaaliset ilmakuvat, laserkeilaus) käytön esteenä ovat olleet kustannukset. Erityisesti laserkeilaus tulee jo suuresta tutkimuspanostuksestakin päätellen varmasti yleistymään tulevaisuudessa, jolloin tarkka latvuspeitto (ja paljon muuta tietoa latvuston

rakenteesta) on mahdollista saada suoraan puustotunnusten mittauksen yhteydessä ilman erillistä latvuspeittoon käytettyä työpanosta. Ennen sitä latvuston rakennetta joudutaan kuvaamaan mallien avulla.

Kaiken kaikkiaan latvuspeiton tutkimuksessa riittänee tekemistä vielä vuosiksi eteenpäin. Kiinnostus aihetta kohtaan on laajaa eri sovellusalueilla, eikä ylivoimaista menetelmää koealan latvuspeiton nopeaan ja tarkkaan estimointiin ole vieläkään olemassa. Tämä tutkimus on toivottavasti yksi askel kohti latvuspeittomittauksen ihannemenetelmän löytymistä.

6. KIRJALLISUUS

- Bonnor, G. M. 1967. Estimation of ground canopy density from ground measurements. *Journal of Forestry* 65(8): 544-547.
- Bonnor, G. M. 1968. A comparison of photo and ground measurements of canopy density. *The Forestry Chronicle* 44(3): 12-16.
- Buckley, D. S., Isebrands, J. G. & Sharik, T. L. 1999. Practical field methods of estimating canopy cover, PAR, and LAI in Michigan oak and pine stands. *Northern Journal of Applied Forestry* 16(1): 25-32.
- Bunnell, F. L. & Vales, D. J. 1990. Comparison of methods for estimating forest overstory cover: differences among techniques. *Canadian Journal of Forest Research* 20:s 101-107.
- Cook, J. G., Stutzman, T. W., Bowers, C.W., Brenner, K. A. & Irwin, L. L. 1995. Spherical densiometers produce biased estimates of forest canopy cover. *Wildlife Society Bulletin* 23(4): 711-717.
- Culvenor, D. S. 2003. Extracting individual tree information. A survey of techniques for high spatial resolution imagery. Teoksessa: Wulder, M. A. & Franklin, S. E. (toim.). *Remote sensing of forest environments: concepts and case studies*. Kluwer Academic Publishers, Boston. 519 s.
- Dawkins, H. C. 1963. Crown diameters: their relation to bole diameter in tropical forest trees. *Commonwealth Forestry Review* 42: 318-333.
- Englund, S. R., O'Brien, J. J. & Clark, D. B. 2000. Evaluation of digital and film hemispherical photography and spherical densiometry for measuring forest light environments. *Canadian Journal of Forest Research* 30: 1999-2005.
- FAO 2000. On definitions of forest and forest change. *Forest Resources Assessment Programme, Working Paper 33*. FAO, Rooma, Italia. 15 s. Saatavilla: <URL:http://www.fao.org/documents/show_cdr.asp?url_file=/docrep/006/ad665e/ad665e00.htm>. Viitattu 22.9.2005.
- Ganey, J. L. & Block, W. M. 1994. A comparison of two techniques for measuring canopy closure. *Western Journal of Applied Forestry* 9(1): 21-23.
- Garrison, G. A. 1949. Uses and modifications for the "Moosehorn" crown closure estimator. *Journal of Forestry* 47: 733-735.
- Gemmell, F. 1999. Estimating conifer forest cover with thematic mapper data using reflectance model inversion and two spectral vegetation indices in a site with variable background characteristics. *Remote Sensing of Environment* 69: 105-121.

- Gemmell, F. & Varjo, J. 1999. Utility of reflectance model inversion versus two spectral indices for estimating biophysical characteristics in a boreal forest test site. *Remote Sensing of Environment* 68: 95-111.
- Gemmell, F., Varjo, J., Strandström, M. & Kuusk, A. 2002. Comparison of measured boreal forest characteristics with estimates from TM data and limited ancillary information using reflectance model inversion. *Remote Sensing of Environment* 81: 365-377.
- Gill, S. J., Biging, G. S. & Murphy, E. C. 2000. Modeling conifer tree crown radius and estimating canopy cover. *Forest Ecology and Management* 126: 405-416.
- Ilvessalo, Y. 1950. On the correlation between the crown diameter and the stem of trees. *Selostus: Puiden latvuksen läpimitan ja rungon välisestä riippuvuussuhteesta. Metsätieteellisen tutkimuslaitoksen julkaisuja* 38(2). 32 s.
- Ishida, M. 2004. Automatic thresholding for digital hemispherical photography. *Canadian Journal of Forest Research* 34: 2208–2216.
- Jackson, M. & Petty, R. 1973. A simple optical device for measuring vertical projection of tree crowns. *Forest Science* 19: 60-62.
- Jennings, S. B., Brown, N. D., & Sheil, D. 1999. Assessing forest canopies and understorey illumination: canopy closure, canopy cover and other measures. *Forestry* 72(1): 59-74.
- Johansson, T. 1985. Estimating canopy density by the vertical tube method. *Forest Ecology and Management* 11: 139-144.
- Kalliovirta, J. & Tokola, T. 2005. Functions for estimating stem diameter and tree age using tree height, crown width and existing stand database information. *Silva Fennica* 39(2): 227-248.
- Kuusipalo, J. 1985. On the use of tree stand parameters in estimating light conditions below the canopy. *Seloste: Puuston standarditunnusten käytöstä metsikön valaistusolojen estimointiin. Silva Fennica* 19(2):185-196.
- Kuusk, A. & Nilson, T. 2000. A directional multispectral forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 72: 244-252.
- Lanteri, D. G., Huete, A., Kim, H. & Didan, K. 2004. Estimation of the fraction of canopy cover from multispectral data to be used in a water soil erosion prediction model. *Gayana (Concepc.)* 68(2): 239–245. Saatavilla: <URL:<http://tinyurl.com/cmzcy>>. Viitattu 19.10.2005.
- Larsson, H. 2002. Acacia canopy cover changes in Rawashida forest reserve, Kassala Province, Eastern Sudan, using linear regression NDVI models. *International Journal of Remote Sensing* 23(2): 335-339.
- Lemmon, P. E. 1956. A spherical densiometer for estimating forest overstory density. *Forest Science* 2: 314-320.

- Lim, K., Treitz, P., Baldwin, K., Morrison, I. & Green, J. 2003. Lidar remote sensing of biophysical properties of tolerant northern hardwood forests. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29(5): 658-678.
- Loetsch, F. & Haller, E. 1973. *Forest Inventory. Volume I: Statistics of forest inventory and information from aerial photographs.* 2nd ed. BLV Verlagsgesellschaft. München. 436 s.
- Lowman, M. D. & Rinker, H. B. (toim.) 2004. *Forest canopies.* 2nd ed. Elsevier Academic Press Boston, Amsterdam. 517 s.
- Maltamo, M., Eerikäinen, K., Pitkänen, J., Hyypä, J. & Vehmas, M. 2004. Estimation of timber volume and stem density based on scanning laser altimetry and expected tree size distribution functions. *Remote Sensing of Environment* 90: 319-330.
- Metsäntutkimuslaitos 2005. Valtakunnan metsien 10. inventointi (VMI 10). Maastotyön ohjeet 2005. Koko Suomi. Helsinki.
- Mitchell, J. E. & Popovich, S. J. 1997. Effectiveness of basal area for estimating canopy cover of ponderosa pine. *Forest Ecology and Management* 95(1): 45-51.
- Montaña, C. & Ezcurra, E. 1980. Simple instrument for quick measurement of crown projections. *Journal of Forestry* 78: 699.
- Næsset, E., Gobakken, T., Holmgren, J., Hyypä, H., Hyypä, J., Maltamo, M., Nilsson, M., Olsson, H., Persson, Å., & Söderman, U. 2004. Laser scanning of forest resources: the Nordic experience. *Scandinavian Journal of Forest Research* 19: 482-499.
- Nuttle, T. 1997. Densiometer bias? Are we measuring the forest or the trees? *Wildlife Society Bulletin* 25(3): 610-611.
- O'Brien, R.A. 1989. Comparison of overstory canopy estimates on forest survey plots. USDA Forestry Service General Technical Report INT-GTR-417. 5 s.
- Pitkänen, J. 2001. Individual tree detection in digital aerial images by combining locally adaptive binarization and local maxima methods. *Canadian Journal of Forest Research* 31: 832-844.
- Pitkänen, J., Maltamo, M., Hyypä, J. & Yu, X. 2004. Individual tree detection on airborne laser based canopy height model. Teoksessa: Thies, M., Koch, B., Spiecker, H., Weinacker, H. (toim.). *Laser scanners for forest and landscape assessment. Proceedings of the ISPRS working group VII/2.* Freiburg, Germany, October, 3-6 2004. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences.* Volume XXXVI, Part 8/W2. S. 187-191.
- Rautiainen, M., Stenberg, P. & Nilson, T. 2005. Estimating canopy cover in Scots pine stands. *Silva Fennica* 39(1): 137-142.

- Robinson, M. W. 1947. An instrument to measure forest crown cover. *The Forestry Chronicle* 23: 222-225.
- Rosema, A., Verhoef, W., Noorbergen, H. & Borgerius, J. J. 1992. A new forest light interaction model in support of forest monitoring. *Remote Sensing of Environment* 42: 23-41.
- Sarvas, R. 1953. Measurement of the crown closure of the stand. *Seloste: Puuston latvusyhteyden mittaaminen. Communicationes Instituti Forestales Fenniae* 41(6). 13 s.
- Strandström, M. 1999. Landsat TM -kuvalta estimoitavien latvuspeiton ja lehtipinta-alaindeksin käyttökelpoisuus metsän kaukokartoituksessa. *Metsänarvioimistieteen Pro gradu*. Helsingin yliopisto. 55 s.
- Strickler, G. S. 1959. Use of the densitometer to estimate density of forest canopy on permanent sample plots. *U.S. Forest Service Research Note* No. 180. 5 s.
- Stumpf, K. A. 1993. The estimation of forest vegetation cover descriptions using a vertical densitometer. Saatavilla <URL:http://www.grsgis.com/publications/saf_93.html>. Viitattu 22.9.2005.
- Suvanto, A., Maltamo, M., Packalén, P. & Kangas, J. 2005. Kuviokohtaisten puustotunnusten ennustaminen laserkeilauksella. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2005: 413-428.
- Teraoka, Y. 1996. An effective mensuration technique for multipurpose management using fish-eye photographic images. Teoksessa: Saramäki, J., Koch, B. & Lund, H. G. (toim): *Remote sensing and computer technology for natural resource assessment*. Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan tiedonantoja 48.
- VALERI-projekti 2005. <URL:<http://www.avignon.inra.fr/valeri/>>. Viitattu 29.11.2005.
- Vales, D. J. & Bunnell, F. L. 1988. Comparison of methods for estimating forest overstory cover. I. Observer effects. *Canadian Journal of Forest Research* 18(5): 606-609.
- Walters, J & Soos, J. 1962. The gimbal sight for the projection of the crown radius. *Faculty of Forestry, University of British Columbia, Vancouver. Res. Note* No. 39.
- Wehr, A. & Lohr, U. 1999. Airborne laser scanning – an introduction and overview. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing* 54: 68-82.
- Welles, J. M. & Cohen, S. 1996. Canopy structure measurement by gap fraction analysis using commercial instrumentation. *Journal of Experimental Botany* 47(302): 1335-1342.
- Williams, M. S., Patterson, P. L. & Mowrer, H. T. 2003. Comparison of ground sampling methods for estimating canopy cover. *Forest Science* 49(2): 235–246.

Yang, J & Prince, S. D. 1997. A theoretical assessment of the relation between woody canopy cover and red reflectance. *Remote Sensing of Environment* 59: 428-439.

Zar, J. H. 1984. *Biostatistical analysis*. 2nd ed. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey.

Yhteensä 54 viitettä.

TUTKIMUKSESSA KÄYTETTYJÄ LYHENTEITÄ JA TERMEJÄ

Lyhenteet

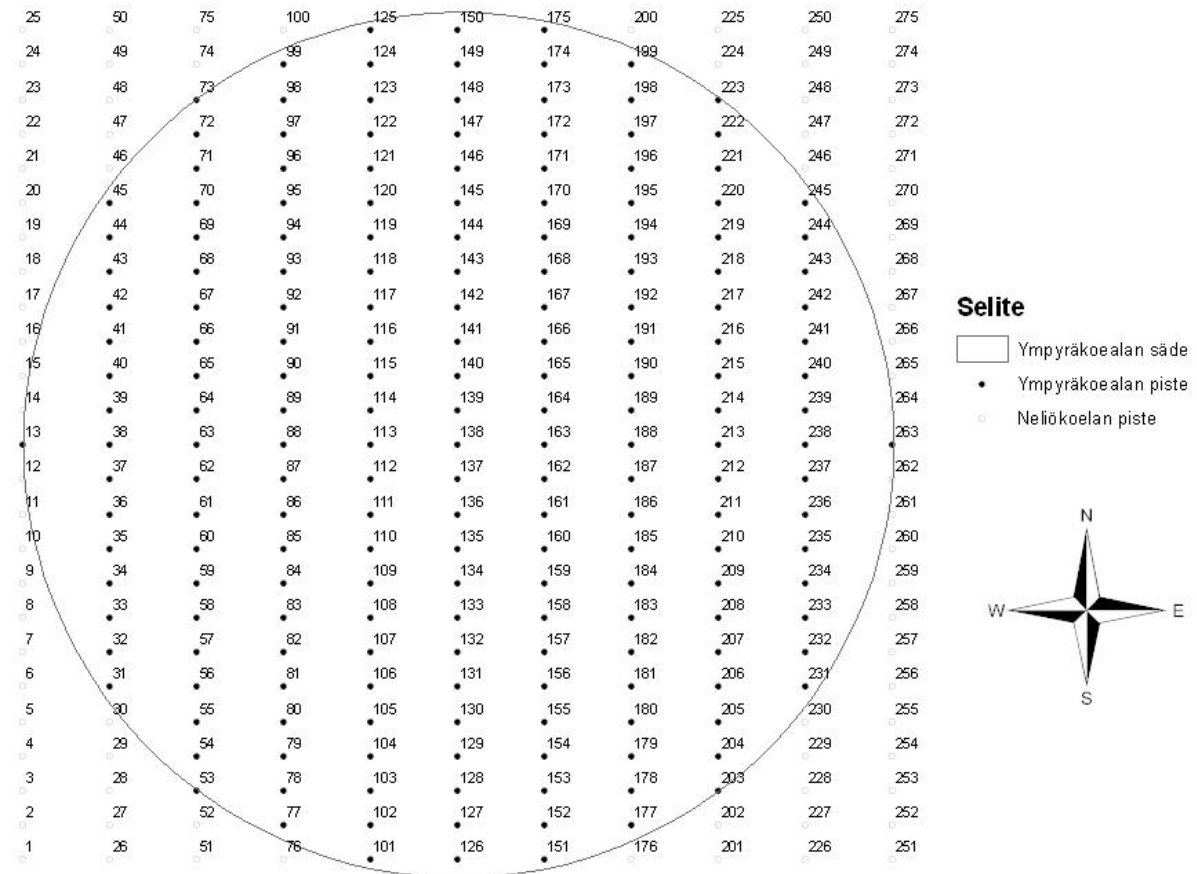
CC	Pohjapinta-ala (Canopy cover)
D	Rinnankorkeusläpimitta
G	Pohjapinta-ala
G _k	Vain koealan keskeltä mitattu pohjapinta-ala
H	Pituus
LAI	Lehtialaindeksi (Leaf area index)
LIS	Linjaleikkausotanta (Line intersect sampling)
N	Runkoluku
P _l	Lehtipuiden osuus
VMI	Valtakunnan metsien inventointi

Termit

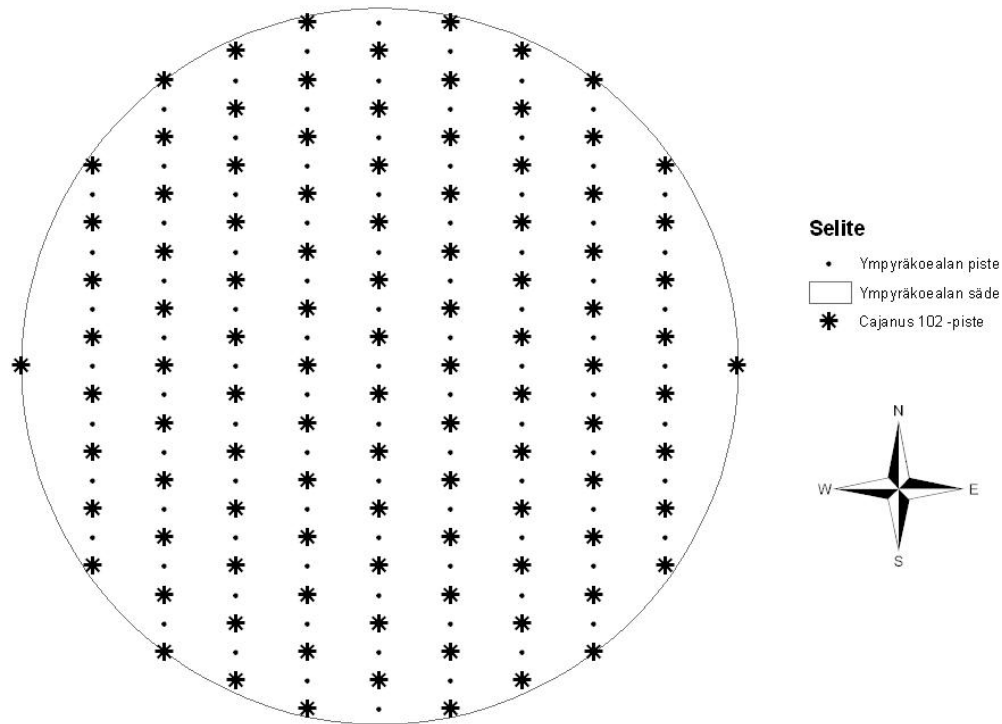
Termi	Englanninkielinen vastine	Selite
Avauskulma	Angle of view	Kulma, joka kertoo kuinka suurta taivaankannen osaa käytetty menetelmä mittaa (s. 7).
Cajanuksen putki	Cajanus tube, sighting tube, vertical tube	Periskooppimainen latvuspeiton mittaväline (s. 10).
Densiometri	Spherical densiometer	Avauskulmallinen, rasiaan sijoitettua peiliä hyödyntävä latvussulkeuman mittaväline (s. 17.)
Hirvitorvi	Moosehorn	Cajanuksen putkea muistuttava avauskulmallinen latvussulkeuman mittaväline (s. 18.)
Latvussulkeuma	Canopy closure, crown closure	Prosenttiosuus, jonka latvusto peittää taivaanpallosta yksittäisestä pisteestä havaittuna. Latvuston sisäiset aukot huomioidaan.
Perinteinen latvuspeitto	-	Kuten pelkkä "latvuspeitto", mutta termi korostaa ettei latvuston sisäisiä aukkoja huomioida (s. 7).
Vaikuttava latvuspeitto	Effective canopy cover	Latvuston pystysuora projektion prosenttiosuus halustusta alasta, kun latvuston sisäiset aukot huomioidaan mittauksessa (s. 7).

Huom. Latvuspeittoon on usein viitattu myös termillä canopy closure, joten kirjallisuudessa käytettyihin termeihin ei kannata sokeasti luottaa, vaan merkitys on tarkistettava tutkimuskohtaisesti.

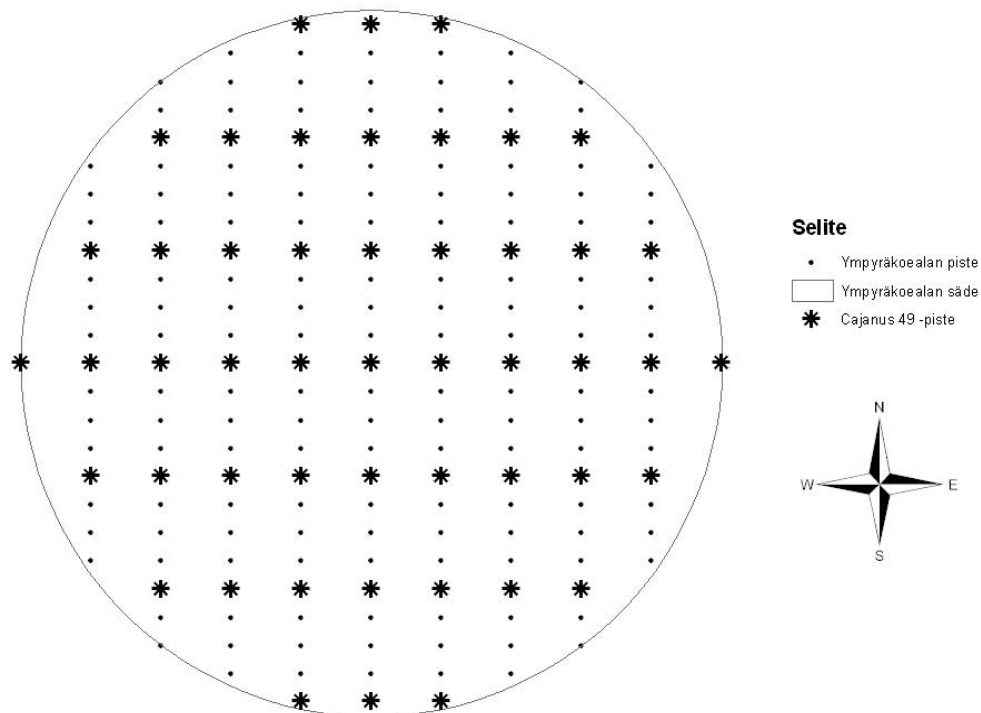
CAJANUKSEN PUTKI -MITTAPISTEIDEN SIJOITTUMINEN KOEALALLE



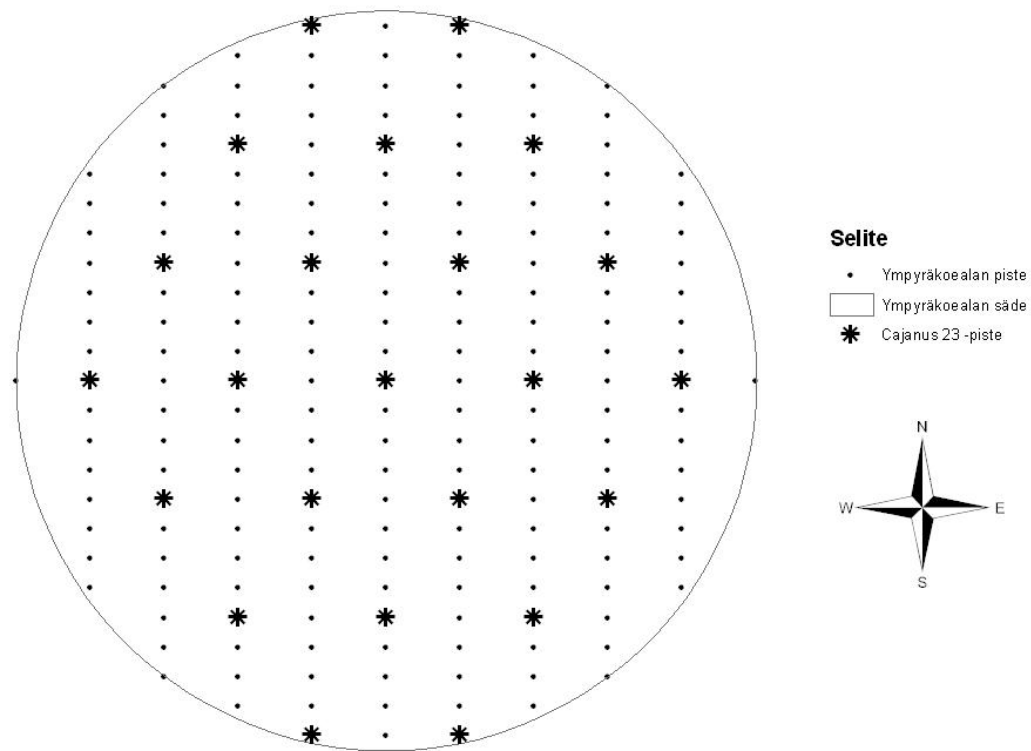
Kuva 1. Latvuspeiton mittapisteiden sijoittuminen neliö- (valkeat ja mustat pisteet) ja ympyräkoealalle (vain mustat pisteet). Ympyräkoealan säteen sisälle jää 195 pistettä 275:stä.



Kuva 2. Cajanuksen putkella tehdyistä mittauksista poimittu 102 pisteen otos. Ympyräkoealan sisään jääneistä 195 pisteestä huomioitiin joka toinen.



Kuva 3. Cajanuksen putkella tehdyistä mittauksista poimittu 49 pisteen otos. Valitut pisteet sijaitsevat neljän metrin välein. Näitä pisteitä käytettiin myös 49 pisteen densiometrimittauksessa.



Kuva 4. Cajanuksen putkella tehdyistä mittauksista poimittu 23 pisteen otos. Valitut pisteet sijaitsevat kahdeksan metrin välein. Näitä pisteitä käytettiin myös 23 pisteen densiometrimittausta varten.