

METSIKÖN RAKENTEEN VAIKUTUS SÄTEILYN
SAMMUMISKERTOIMEEN

Titta Majasalmi

Metsänarvioimistieteen pro gradu -tutkielma maatalous- metsätieteiden
maisterin tutkintoa varten

Helsingin yliopisto
Metsätieteiden laitos
Tammikuu 2011

1. Johdanto.....	1
1.1 Tutkimuksen tausta.....	1
1.2 Kirjallisuuskatsaus.....	3
1.2.1 Säteilyn sammuminen latvustossa	3
1.2.2 Ryhmittäminen	6
1.2.3 LAI-2000-laite	8
1.2.4 Latvusmuodon kehittyminen	14
1.3 Tutkimustehtävän rajaus	17
2. Materiaali ja menetelmät	17
2.1 Maastomittaukset.....	17
2.1.1 Intensiivialojen kuvaus	17
2.1.2. VALERI -alojen kuvaus.....	19
2.1.3. LAI-2000 -mittaukset.....	20
2.2 Teoreettiset simuloinnit	21
3. Tulokset	25
3.1. Intensiivialojen latvuspeitto	25
3.2. Otoksoon vaikutus mittaustuloksiin	27
3.3 LAI-2000-laitteen kehäanalyysi	28
3.4 Lehtialan koaloittainen kehittyminen	29
3.5 Koaloittaisten G-funktioiden tarkastelu	31
3.5.1 Latvuston aukkoisuuden kulmariippuvuus	31
3.5.2 Keskikesän G-funktioiden vertailu	32
3.5.3 G-funktioiden muutos kasvukauden aikana	36
3.5.4 VALERI -alojen G-funktioiden tarkastelu.....	37
3.6 Teoreettisen ja mitatun G-funktion vertailu.....	39
3.6.1 Latvusmuodon tarkastelu	39
3.6.2 Latvuksen sisäisen ryhmittäisyyden arviointi	41
3.6.3 Latvuksen muotosuhteen vaikutus G-funktion muotoon.....	42
4. Tulosten tarkastelu	44
4.1 Tulosten luotettavuuden arvioiminen	49
4.2 Tulosten soveltuvuus	50
5. Johtopäätökset.....	52
Lähdeluettelo	53

1. Johdanto

1.1 Tutkimuksen tausta

Puut pyrkivät mahdollisimman suureen fotosynteesitehokkuuteen, sillä fotosynteesi mahdollistaa puiden kasvun ja kehityksen. Tehokkaimmin valoa sitovat puut kasvavat nopeimmin ja saavuttavat metsässä kilpailuedun naapuripuihin nähden. Evoluutio on muokannut puita eri ympäristöihin ja metsän eri sukkessiovaiheisiin paremmin sopiviksi, jolloin merkittävimäksi tekijäksi valonsidonnan kannalta muodostuu latvuksen koko, muoto ja lehtiasento. Kasvuston rakenne (engl. plant architecture) voidaan määrittää kohteen muodon, koon, geometrian sekä ulkoisen rakenteen kautta (Ross 1981). Laajemmin se voidaan määrittellä kokoonpanon (sisältäen kasvin eri komponentit), geometrian (komponenttien muodot ja sijainnit) sekä topologian (komponenttien väliset yhteydet) kautta (Godin 2000). Latvustolla tarkoitetaan tässä sitä tilavuutta, johon latvustoelementit (lehdet ja oksat) ovat jakautuneet. Interseptio tarkoittaa sitä osaa auringosta kasvustoon saapuneesta säteilystä, joka osuu lehtiin (Smolander & Stenberg 2005). Latvuston yksittäisten rakenteellisten ominaisuuksien avulla ei voida arvioida interseption määrää. Sen määrittäminen on kuitenkin mahdollista kaikkien rakenteellisten komponenttien yhteisvaikutuksen avulla. Kasvuston G-funktio kuvaa säteilyn vähenemistä tai ”sammumista” auringon eri korkeuskulmissa varjostavan lehtialan suhteen (Stenberg 1996b). Sen vuoksi sitä kutsutaan sammumiskertoimeksi. G-funktio voidaan ymmärtää myös interseption tehokkuutta kuvaavana muuttujana, sillä kasvustossa sammuva säteily tarkoittaa samaa kuin kasvustoon sitoutunut säteily. G:n arvon kasvaessa vähenee latvuston läpäisevä säteily määrä lehtialaindeksi pysyessä ennallaan. Lehtialaindeksi (LAI) kuvaa lehtien yhteenlasketun toispuoleisen pinta-alan suhdetta maapinta-alaan. Neulasten pinta-alana käytetään puolta vaipan pinta-alasta (Chen & Black 1992). Sammumiskertoimen arvo riippuu lehtien/neulasten suuntajakaumasta, latvusmuodosta sekä latvuksen sisäisestä rakenteesta, ja se muuttuu auringon liikkuessa taivaankannella (säteilyn tulosuunnan muuttuessa). G-funktion arvoon vaikuttaa lisäksi ryhmittäminen, joka johtuu latvusten epätasaisesta jakautumisesta tilaan sekä lehtialan epätasaisesta jakautumisesta latvustoon. Lehdet (tai versot), oksat ja rungot lisäksi varjostavat toisiaan, joka vähentää interseptiota.

Metsien kaukokartoitusmenetelmien kehittämiseksi tulee erilaisten metsikkörakenteiden vaikutusta metsän heijastukseen selvittää (Rautiainen ym. 2008b). Olisi myös tärkeää tietää, mitkä metsän rakennetta kuvaavat muuttujat (esimerkiksi: metsikön tiheys, LAI, latvusmuoto ja -tilavuus) ovat tärkeimpiä metsän heijastussignaalin muodostumisessa, sillä monet rakenteelliset ja biokemialliset (esimerkiksi lehtien ja maaperän) yhdistelmät voivat aiheuttaa samankaltaiset optiset ominaisuudet (spektrin). (Rautiainen ym. 2008b.) Myöskään kvantitatiivisia yhteyksiä kasvillisuuden heijastuksen ja rakenteellisten ja biokemiallisten ominaisuuksien vuodenaikaisvaihteluiden välillä ei ole systemaattisesti selvitetty. Latvuston rakennetta on mitattu perinteisesti latvuston lehtialaindeksin sekä aukkoisuuden avulla, sillä vihreän biomassan määrä vaikuttaa merkittävässä määrin metsästä heijastuvaan säteilyyn.

Latvuksen muodon estimointiin yleisimmin käytetyt menetelmät perustuvat joko yksittäisen latvuksen projektioalan laskentaan (eri katselukulmissa) tai kaikkien kasvielementtien (esimerkiksi neulasten) tarkkaan paikannukseen latvuksen sisällä. (Rautiainen ym. 2008a). Yksinkertaisia, latvusmuotoa approksimoivia, geometrisia muotoja (esimerkiksi kartio, sylinteri ja ellipsi) on käytetty runsaasti tutkittaessa latvuston säteilyoloja (Oker-Blom & Kellomäki 1982b, Nilson 1999). Kaukokartoituksen tarpeisiin vastaavan latvusmallin tulisi olla toimiva laajoilla alueilla, laskennallisesti tehokas ja riittävän tarkka (Rautiainen ym. 2008a). LAI-2000-laite estimoii lehtialaindeksiä latvuston läpi kulkevan säteilyn avulla. Laitteen toiminta ja mittausten tarkkuuteen vaikuttavat tekijät tunnetaan hyvin. Tutkimusta on tehty latvustoelementtien välisestä ryhmittymisestä, runkojen ja oksien vaikutuksesta sekä mahdollisuuksista korjata laitteen antamaa estimaattia erilaisten korjauskertoimien avulla. Puulajin vaikutusta säteilyn sammumiseen ei kuitenkaan tunneta, joten perustutkimukselle on yhä tarvetta. Tämän tutkimuksen tavoitteena on selvittää, kuinka metsikön rakenne vaikuttaa säteilyn sammumiseen, ja minkälaisia muutoksia säteilyn sammumisessa voidaan havaita kasvukauden aikana.

1.2 Kirjallisuuskatsaus

1.2.1 Säteilyn sammuminen latvustossa

Lehdet voivat jakautua latvustoon kahdella täysin erilaisella tavalla, joilla molemmilla on omat adaptiiviset vahvuutensa. Yksikerroksisissa latvuksissa lehdet ovat pakkautuneet tiiviisti yhteen kerrokseen kun taas monikerroksisissa latvuksissa ne muodostavat monia löyhästi jakautuneita kerroksia. (Horn 1971.) Hornin (1971) mukaan yksikerroksisen latvuksen optimaalinen lehtien jakauma on sellainen, jossa lehdet ovat jakautuneet säännöllisesti, niin että lehtien päällekkäisyys ja aukkoajat ovat minimissään. Monikerroksisessa latvuksessa lehdet voivat olla satunnaisesti jakautuneet niin kauan kuin lehtien koko on riittävän pieni, ja lehdet eivät varjosta toisiaan. Monikerroksinen latvusrakenne vaatisi äärettömän lehtialan luodakseen totaalisen varjon. Monikerroksisen kasvuston fotosynteesitehokkuus lisääntyy, mikäli ylempänä olevat lehdet ”riippuvat” (suuntautuvat vertikaalisesti) alempana olevien lehtien asettuessa enemmänkin horisontaalisesti. Auringon liike taivaankannella lisää syvällä kasvustossa olevien lehtien (ja kerrosten) mahdollisuuksia, sillä vaikka lehdet olisivatkin suuren osan ajasta varjossa, ne saisivat riittävästi valoa hengitykseensä. (Horn 1971).

Fotosynteettisesti aktiivinen säteily (PAR, engl. photosynthetically active radiation) on metsän kasvun taustalla olevan fotosynteesin energian lähde. PAR -säteilyn aallonpituusalue (400 – 700 nanometriä) vastaa näkyvän valon aallonpituusaluetta, jonka vuoksi siitä käytetään termiä ”valo”. Lehden pinnan kohtaava saapuva säteily voi joko absorboitua lehteen, läpäistä lehden tai heijastua lehdestä. PAR -säteilyn absorptio on suurinta punaisella (noin 620 – 680 nanometriä) ja sinisellä (noin 450 – 500 nanometriä) aallonpituusalueella, sillä vihreä kasvillisuus käyttää niitä tehokkaasti hyödykseen fotosynteesissä. Absorptio on vähäisintä näkyvän spektrin vihreällä alueella (noin 500 – 550 nanometriä). (Stenberg 1996b.)

Kasvustoissa on suunta- ja spektrijakaumansa puolesta kolmenlaisia säteilykomponentteja: (1) kasvustossa siroamatta kulkenutta suoraa auringonsäteilyä, (2) kasvustossa siroamatta kulkenutta hajasäteilyä sekä (3) maanpinnasta tai kasveista sironnutta säteilyä. Metsän

geometrinen rakenne vaikuttaa säteilyoloihin metsän sisällä. Lehtien määrä ja tilajakauma ovat tärkeimmät latvuston aukkoisuuteen (engl. canopy gap fraction) vaikuttavat tekijät. Latvuston aukkoisuus tarkoittaa latvuston läpäisevyyttä, joka määrittelee latvustossa olevien aukkojen läpi siroamatta kulkeneen säteilyn määrän. (Stenberg 1996b.)

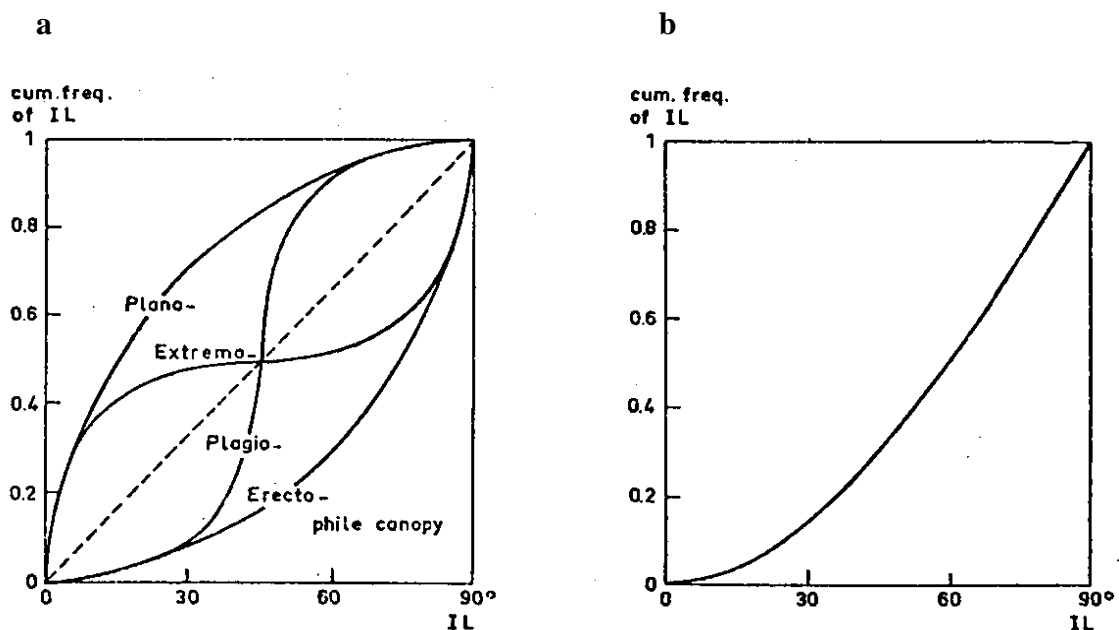
Beerin lain (Brock 1962) mukaan latvuston läpi pääsevän säteilyn voimakkuus pienenee eksponentiaalisesti absorboivan aineen (lehtien) määrän kasvaessa. Tämä tarkoittaa, että valosta pidättyy saman paksuisissa kerroksissa yhtä suuri suhteellinen osuus. Symbolia L käytetään usein kuvaamaan kumulatiivista lehtialaindeksiä (engl. downward cumulative leaf area index), joka tarkoittaa kasvustossa tietyn korkeuden yläpuolella sijaitsevaa lehtialaa maapinta-alaa kohden (Stenberg 1996b.) Horisontaalisesti homogeenisessa kasvustossa suoran säteilyn irradianssi (pinnalle lankeavan säteilyn määrä aika- ja pinta-alayksikköä kohden) vaakasuoralla tasolla syvyydellä L kasvustossa voidaan esittää yhtälöllä, joka on sovellus ilmakehäfysiikassa tunnetusta Beerin laista, ja sitä käyttivät kasvustoille ensimmäisen kerran Monsi & Saeki (1953):

$$I(L) = I \exp(-G_1 L / \cos \theta) \quad (1)$$

missä I kuvaa suoran säteilyn irradianssia vaakatasossa kasvuston yläpuolella, θ kuvaa auringon zeniittikulmaa, L on lehtialaindeksi tarkastelutason yläpuolella, $I(L)$ on suoran säteilyn irradianssi tarkastelutasolla ja G_1 on sammumiskerroin (engl. extinction coefficient). Huomaa, että $I(L)/I$ kuvaa latvuston läpäisevyyttä (engl. canopy transmittance) zeniittikulmassa (θ). Sammumiskerroin (G_1) voidaan määrittellä aurinkoa vasten kohtisuoralle tasolle projisoidun lehtialan ja toispuoleisen lehtialan suhteeksi (Nilson 1971). Tämän alkuperäisen määritelmän mukaan G -funktion saamat arvot riippuvat vain lehtiasennosta. Tutkielmassa yleistän käsitettä ja määrittelen kolme eritasoista G -funktioita. Käytän merkintöjä G_1 kuvaamaan lehden/neulasen G -funktioita, G_v verson G -funktioita ja G_p metsikön (puulajikohtaista) G -funktioita.

Sammumiskertoimen arvon kasvaessa vähenee latvuston läpäisevä säteilymäärä. Sammumiskertoimen arvo riippuu lehtien/neulasten suuntajakaumasta, latvusmuodosta sekä latvuksen sisäisestä rakenteesta, ja se muuttuu auringon liikkua taivaankannella (säteilyn tulosuunnan muuttuessa) (Stenberg 1996b.) Lehtien ollessa lähes vaakasuorassa asennossa

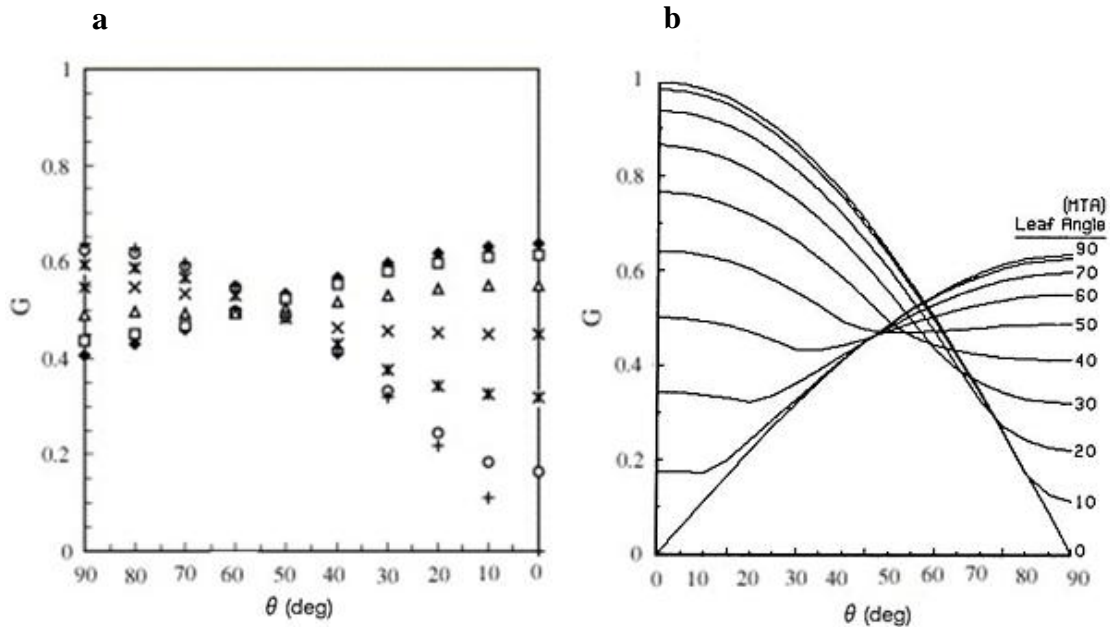
(engl. planophile orientation, de Wit 1965) sammumiskerroin saa suuria arvoja auringon paistaessa suoraan ylhäältä. Mikäli aurinko paistaa enemmän horisontin suunnasta, ovat pystysuunnassa (engl. erectophile orientation, de Wit 1965) olevat lehdet tehokkaampia sammuttamaan säteilyä (kuvat 1a ja b). Lehtiasennolla ei ole kuitenkaan pidemmällä aikavälillä suurta vaikutusta interseptioon auringon liikkeen johdosta (Stenberg 1996b). Puhuttaessa säteilyn ”sammumisesta” on hyvä ymmärtää, ettei tietystä suunnasta tulevan säteilyn voimakkuus pienene lehtialan kasvaessa, vaan latvustossa (auringon suunnassa) olevan aukon todennäköisyys (engl. gap probability) kyseisellä kohdalla vähenee. (Stenberg 1996b.)



Kuva 1. a. Neljän erilaisen lehtien tilajärjestyksen vaikutus säteilyn sammumiseen. IL = lehden inkliinaatio (engl. leaf inclination). b. Lehtien pallomaisen orientaatiojakauman kertymäfunktio. IL= sitoutunut säteily (engl. intercepted light) (de Wit 1965).

Havupuilla G_1 :n saamat arvot sijoittuvat kapeammalle alueelle kuin litteälehtisillä lajeilla neulasen kolmiulotteisen rakenteen vuoksi. Esimerkiksi vertikaalisesti suuntautuneen neulasen G :n arvo ei olisi zeniittisuunnassa 0, vaan neulasen poikkileikkauksen ja toispuoleisen pinta-alan suhde. Kuvissa käyrät (kuvat 2a ja b) leikkaavat toisensa auringon zeniittikulmassa $57,5^\circ$, jolloin neulasen ja lehden orientaatio vastaa G :n arvoa 0,5 (kuva 2a). (Stenberg 2006.) Lehden G -funktiota laskettaessa on oletettu, että lehdet ovat äärettömän ohuita. Neulasen G -funktion määrittelyssä on neulasen paksuus oletettu mitättömäksi sen pituuteen nähden. Huomaa, että G :n keskiarvo (0,5) voidaan määrittää myös kaikkien

katselukulmien (säteilyn tulosuuntien) yli ollen riippumaton lehtien (neulasten) orientaatiojakaumasta (Miller 1967). Tämä tarkoittaa käytännössä, että latvuston lehtien tilajakauma oletetaan pallomaisesti orientoituneeksi (engl. spherically oriented) (kuva 1b).



Kuva 2. a. Neulasen G-funktio. Huomaa, että zeniittikulma vähenee oikealle. (Stenberg 2006). b. Litteän lehden G-funktio (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992).

1.2.2 Ryhmittäminen

Havumetsissä ryhmittymistä (latvustoelementtien sijaintien positiivinen korrelaatio) ilmenee latvustossa niin versojen, oksien kuin latvustenkin tasolla (Oker-Blom ym. 1991, Nilson 1992). G-funktio voidaan kuitenkin määrittää myös ryhmittyneille kasvustoille (metsiköille) niin, että kaava 1 toteutuu. Tällöin G:n tulkinta kuitenkin muuttuu niin, ettei Nilsonin (1971) määritelmä enää päde. Kun yksittäisen neulasen sijasta perusyksiköksi valitaan verso, voidaan kaavan 1 G (G_v) määrittellä projisoidun versonalan ja neulasalan suhteeksi. Tälle suhteelle käytetään nimeä STAR (engl. silhouette to total leaf area ratio), mutta koska alkuperäisen määritelmän mukaan neulasalana on käytetty koko vaipan alaa $G_v = 2STAR$ (Oker-Blom & Smolander 1988).

STAR_{mean} (lasketaan kaikkien tarkastelusuuntien keskiarvona) arvon avulla voidaan tutkia muun muassa latvuston itsevarjostusta. STAR_{mean} -arvo vaihtelee säteilyn suunnan mukaan ollen suurimmillaan verson akselin ollessa kohtisuorasti säteilyn suuntaa vasten. Neulasen kuperuuden vuoksi ei sen projektioalakaan ole koskaan sama kuin sen säteilyä vastaanottava ala. Verson projektioala (siluettiala) jää aina pienemmäksi kuin verson neulasten yhteenlaskettu projektioala, sillä neulaset varjostavat toisiaan. (Stenberg 1996b.) Kapeat neulaset, neulasten ryhmittymisen versoihin, syvä latvusto ja alhainen auringon korkeuskulma parantavat kuitenkin metsän sisäisiä säteilyoloja, sillä hajasäteilyn suuri osuus (puolivarjo) tasoittaa suoran säteilyn jakaumaa. Tasaisesti lehtipinnalle jakautuva säteily kasvattaa nimenomaan syvällä kasvustossa olevien varjoneulasten ja -versojen fotosynteesinopeutta. (Stenberg 1996b.) Maksimaalisen fotosynteesin kannalta optimaalinen strategia on säilyttää (turhankin) syvä latvusto ja lisätä interseptiota lehtiasentoa muuttamalla vasta kun varjostus on voimakasta (Stenberg 1996a). STAR_{mean} arvoa 0,16 voidaan käyttää silloin, kun tarkempaa tietoa puulajikohtaisesta keskiarvosta ei ole saatavissa (Therezien ym. 2007). STAR_{mean} arvon tulisi olla latvuston yläosassa pieni ja kasvaa vähitellen varjostuksen lisääntyessä syvemmälle kasvustossa mentäessä (Stenberg 1996a). Stenbergin ym. (1994b) tutkimuksen mukaan suurimmat erot valo- ja varjoverson STAR arvoissa olivat lännenpihdalla (*Abies lasiocarpa*) (0,15 verrattuna 0,31) ja kuusella (*Picea abies*) (0,12 verrattuna 0,18). Pienin ero valo- ja varjoverson STAR arvoissa oli männyllä (*Pinus sylvestris*) (0,13 verrattuna 0,14). Tämän tutkielman teoreettisissa simuloinneissa käytetään STAR_{mean} arvoa 0,15, sillä se vastaa kuusen valo ja varjoneulasten STARin keskiarvoa, ja yliarvioi männyn STAR -arvoa vähemmän kuin STAR_{mean} keskiarvo 0,16.

Säteilyn sammumista metsikkötasolla (G_p) voidaan arvioida LAI-2000-laitteen tuottamien aukkoisuusarvojen ja lehtialaindeksi -estimaatin perusteella. Tätä käsitellään tarkemmin luvuissa 1.2.3 LAI-2000-laite ja 2.2 Teoreettiset simuloinnit. Ryhmittymisen lisääntyessä latvusto läpäisee enemmän valoa, jonka vuoksi G_p :n arvo pienenee. Metsikkötasolla sammumiskertoimen arvo riippuu auringon kulmasta ja muuttuu päivän ja vuoden aikana. Suurin osa G_p :n kausittaisesta vaihtelusta johtuu valon latvuksessa kulkeman matkan pituuden muutoksista. (Stenberg ym. 1994a.)

Versojen asento vaihtelee latvuston eri syvyyksillä: latvuston yläosissa on eniten vertikaalisesti suuntautuneita versoja, kun taas latvuston alaosissa suuntautuminen oli pääosin

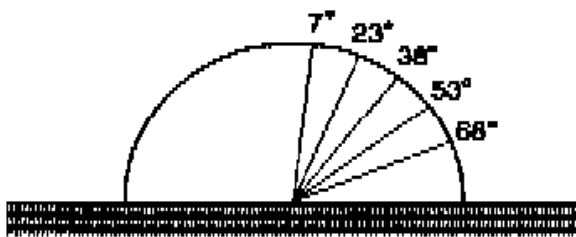
horizontaalista. Versojen inkliinaatiojakauma on pallomaisempi (engl. spherical distribution) vanhoilla puilla. (Stenberg ym. 1994b.) Varjoversojen STAR (säteilyn sitomistehokkuus) on suurempi kuin valoversojen (Stenberg ym. 1995), sillä niiden itsevarjostus on valoversoja vähäisempää. Tämä johtuu varjoverson neulasten asettumisesta kutakuinkin vaakasuoralle tasolle (kampamaisesti), jolloin ylhäältä päin tulevan valon sidonta tehostuu (Stenberg 1996b). Havupuulajeilla, joiden varjoversoilla on suurin maksimaalinen STAR löytyvät myös suurimmat LAI-arvot ja suurin tuottavuus (Leverenz & Hinckley 1990, Stenberg 1996a). Päiväntasaajalla, jossa aurinko paistaa korkealta, pysty lehtiasento on fotosynteesille edullisin erityisesti suurilla LAI:n arvoilla (Duncan ym. 1967, Wang ym. 1992). Säteilyn irradianssi lehden pinnalla alenee pystyn lehtiasennon vaikutuksesta, eikä ylitä saturoitumispistettä. Toisaalta pysty lehtiasento myös pidättää säteilyä heikommin, joten pienillä LAI:n arvoilla voi suuri osa säteilystä jäädä absorboitumatta. Vaakasuora lehtiasento toimii parhaiten kaukana päiväntasaajasta olevilla alueilla ja pienillä LAI:n arvoilla (Ross 1970, Oker-Blom & Kellomäki 1982a).

1.2.3 LAI-2000-laite

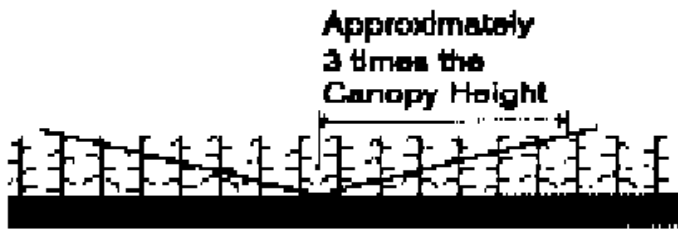
LAI-2000-laitteen tuottamien aukkoisuus- ja lehtialaindeksi-estimaattien avulla voidaan arvioida metsikkötasolla ilmenevää kasvustoelementtien orientaatiota ja muotoa. Lehtialaindeksi on dynaaminen parametri, joka muuttuu sekä päivittäin (eniten keväällä ja syksyllä) että metsädynamiikan kautta vuodesta toiseen (Welles 1990). Sen avulla voidaan kuvata esimerkiksi latvuksen biomassaa, elinvoimaisuutta, metsän tuotoskykyä ja terveydentilaa (Rautiainen ym. 2006). Lisäksi lehtialaindeksin avulla on mahdollista tutkia metsikön heijastuksen ja rakenteen välisiä vuodenaikaisvaihteluita (Rautiainen & Heiskanen 2010). Lehtialaindeksin estimointi mahdollistaa myös metsien globaalin seurannan (Rautiainen ym. 2006). Globaalia lehtialan seurantaa tekee esimerkiksi NASA (National Aeronautics and Space Administration), joka laskee päivittäin MODIS -satelliittikuvista kaikille maa-alueille lehtialaindeksin kilometrin resoluutiolla (NASA:n MODIS Website). Laitteita, kuten LAI-2000, on kehitetty sillä mittausten suorittaminen suorilla menetelmillä on työlästä ja aikaa vievää. Suorilla menetelmillä tarkoitan destruktiivista otantaa, joka tuhoaa osan tutkittavasta kohteesta. Lehtialaindeksiä voidaan estimoida myös kalansilmäkuvilta, mutta menetelmän heikkoutena voidaan pitää kuvien työlästä jälkikäsitteilyvaihetta.

LAI-2000-laite on yksi tavallisimmista lehtialan mittaamiseen käytetyistä välineistä: se laskee latvuston ala- ja yläpuolisen säteilyn suhteen avulla estimaatin lehtialaindeksistä Beerin lakia soveltaen. (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992). Mitatun säteilyn aallonpituusalue on 320 - 490 nanometriä, sillä tuolla aallonpituusalueella lehdet/neulaset ovat optisesti mustia.

LAI-2000-laitteen optinen sensori mittaa latvuston valon läpäisevyyden viidessä eri zenitiittikulmassa samanaikaisesti. Erityisellä kalansilmälinsillä kuva projisoituu sarjana samankeskisiä ympyröitä laitteen muistiin. Mitatut kulmat vaihtelevat välillä 0 – 74 astetta zenitiitistä (0,0 – 12,3°, 16,7 – 28,6°, 32,4 – 43,4°, 47,3 – 58,1° ja 62,3 – 74,1°) zenitiitistä (kuva 3). Koealan ympärille tulisi jäädä alue, joka vastaa puustotunnuksiltaan koealan puustoa. Koealan säteen tulisi olla vähintään koealan valtapuuston pituus kerrottuna kolmella (kuva 4). Tätä pienemmillä koealoilla tulee varmistaa mitattavan alueen koko, sillä koealan ulkopuolisella puustolla on vaikutusta mitattavaan estimaattiin. Mikäli koealan koko ei ole riittävä suhteessa vallitsevan puuston pituuteen, voidaan pienimmän korkeuskulman omaava viides kehä jättää pois laskuista (myös muissa erityistilanteissa näin voidaan menetellä). Lehtialaindeksin estimaatti saadaan latvuston ala- ja yläpuolisen säteilyn suhteen avulla. Jokaiselle kehälle lasketaan oma suhde latvuston ala- ja yläpuolisesta säteilystä. Mittaus voidaan suorittaa yhdellä tai kahdella LAI-2000-laitteella samanaikaisesti. Yhtä laitetta käytetään taimikoiden tai peltokasvien lehtialan mittaamiseen. Suoritettaessa mittauksia yhdellä laitteella, mitataan lukema ensin latvuston päältä ja sitten latvuston alta. Kahdella laitteella mittaus suoritetaan samoin, mutta toinen laitteista pysyy latvuston yläpuolella ja toinen alapuolella. Kahden laitteen samanaikaisella käytöllä saadaan tarkempia tietoja, sillä säteilytiedot tallentuvat lähes samanaikaisesti, toisin kuin yhtä laitetta käytettäessä. (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992)



Kuva 3. Kalansilmälinsillä kuva projisoituu sarjana samankeskisiä ympyröitä laitteen muistiin. Kuvassa näkyvät kulmien keskiarvot. (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992.)



Kuva 4. Vallitsevan puuston piteuden vaikutus LAI-2000-laitteen näkökenttään. (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992.)

LAI-2000-laitteen käytön perusoletukset ovat: 1. Lehdet (neulaset) ovat optisesti mustia eli ne absorboivat kaiken niihin osuvan säteilyn aallonpituusalueella 320 - 490 nanometriä, 2. Lehdet ovat jakautuneet latvustoon satunnaisesti, 3. Lehdet ovat pieniä verrattuna jokaisen kehän kokoon, 4. Lehvästön suuntajakauma (atsimuutin suhteen) on satunnainen (kuva 2b). (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992.)

Seuraavaksi esittelen lyhyesti laskentaperiaatteen, jolla LAI-2000-laite estimoii lehtialaindeksiä. Menetelmän taustalla olevan teorian löytää kokonaisuudessaan LAI-2000-laitteen manuaalista LAI-2000 Plant Canopy Analyzer ja aiheeseen kiinteästi liittyvistä tieteellisistä artikkeleista: Miller 1967, Nilson 1971, Lang 1991, Gower & Norman 1991 ja Stenberg 2006.

LAI-2000-laite laskee latvuston läpäisemästä valomäärästä lehtialan seuraavasti:

$$L = -2 \int_0^{\pi/2} \ln[T(\theta)] \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (2)$$

jossa L on lehtialaindeksi (LAI) ja $T(\theta)$ lehvästön valonläpäisevyys tai aukkoisuus (engl. gap fraction) zeniittikulmassa (θ). Kaavan 2 riippuvuus pitää paikkansa lehvästössä, jonka kuperat lehdet (neulaset) ovat satunnaisesti jakautuneet. Latvuston aukkoisuus on tällöin

$$T(\theta) = \exp \left[\frac{-G_l(\theta)L}{\cos \theta} \right] \quad (3)$$

jossa G_1 on kasvuston sammumiskerroin (engl. extinction coefficient) (kuva 2a ja b). Huomaa, että kaava 3 on identtinen kaavan 1 kanssa, kun $I/I(L)$ korvataan $T(\theta)$:lla. G_1 :n arvo muuttuu katselukulman tai lehtien asennon vaihtuessa, mutta sen keskiarvo kaikkien katselukulmien yli on lehtien asennosta riippumaton (Miller 1967):

$$\int_0^{\pi/2} G_1(\theta) \sin \theta d\theta = \frac{1}{2} \quad (4)$$

Kaavojen 3 ja 4 avulla voidaan todeta kaavan 2 oikean puolen olevan yhtä kuin L. LAI-2000-laitte mittaa lehvästön valonläpäisevyyden (latvuston aukkoisuuden) viidestä eri zenittikulmasta, jotka ovat $\theta_i = 7^\circ, 23^\circ, 38^\circ, 53^\circ$ ja 68° . Laitte laskee näiden kulmien avulla lehtialaindeksille arvion (LAI_{pca}):

$$LAI(pca) = 2 \sum_{i=1}^5 K_i W_i \quad (5)$$

jossa K_i kuvaa kontaktitiheyttä (engl. contact frequency) ja vastaa kaavan 2 termiä $-\ln[T(\theta_i)] \cos \theta_i$, ja kehän i painoarvo W_i lasketaan kaavalla $W_i = \sin \theta_i d\theta$. Painoarvot ($W_i = 0,034, 0,104, 0,160, 0,218$ ja $0,494$) vastaavat taivasalaa, joka on yhtenevä kehien koon kanssa. Kaavan 5 pohjalta laskettu LAI -estimaatti kuvaa efektiivistä lehtialaindeksiä, jos lehdet (neulaset) eivät sijaitse satunnaisesti. Siinä tapauksessa, ei LAI-2000-laitteen mittausten pohjalta laskettu G myöskään vastaa todellista G -funktiota.

Gower ja Norman (1991) havaitsivat ensimmäisinä neulasten ryhmittymisen versoihin tuottavan aliarviota LAI-2000-laitteen tuottamaan estimaattiin. Ryhmittymisen vaikutuksen poistavia korjauskertoimia on yritetty kehittää vaihtelevalla menestyksellä (Gower & Norman 1991, Stenberg 1996c, Stenberg ym. 1994b). Neulasten ryhmittymisen versoihin ei kuitenkaan estä Beerin lain soveltamista, sillä perusyksiköksi voidaan neulasten sijasta valita verso. Näiden valintojen välinen ero näkyy selvimmin G :n arvossa, koska sen arvo riippuu perusyksikön geometriasta.

Kun verso oletetaan perusyksiköksi, G :n määritelmä muuttuu projisoidun versonalan ja toispuoleisen kokonaisneulasalan suhteeksi (G_v) (Stenberg ym. 1994b). Huomaa, että Millerin (1967) kaava (kaava 4) voidaan esittää myös seuraavasti

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} LG_l(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = \frac{L}{2} \quad (6)$$

Koska verson neulasten välillä on keskinäistä varjostusta, verson keskimääräinen G_v -arvo on pienempi kuin 0,5 ja saamme kaavan 6 sijasta

$$\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} LG_v(\theta, \phi) \sin \theta d\theta d\phi = \frac{\beta L}{2} \quad (7)$$

jossa β (<1) on itsevarjostusparametri. Verson G -funktio saa siis muodon $G_v = \beta G_l$. Parametri β kuvaa ylemmän puoliavaruuden kaikkien suuntien yli keskiarvoistettua projisoidun versoalan ja vastaavasti projisoidun neulasalan suhdetta (joka ilman neulasten keskinäistä varjostusta olisi 1). Arvo $1-\beta$ kuvaa näin keskimääräistä verson projektioalan vähenemistä, joka johtuu verson neulasten keskinäisestä varjostuksesta. Koska versojen oletetaan jakautuneen atsimuutin suhteen satunnaisesti voimme kirjoittaa: $G_v(\theta) = G_v(\theta, \phi)$ (Stenberg ym. 1994b). Kaavasta 7 seuraa

$$L = \frac{2}{\beta} \int_0^{\pi/2} LG_v(\theta) \sin \theta d\theta = \int_0^{\pi/2} \frac{-2}{\beta} \ln[T(\theta)] \cos \theta \sin \theta d\theta \quad (8)$$

Kaavan 7 perusteella lehtialaindeksin (L) ja LAI-2000-laitteen välinen suhde voidaan kuvata yhtälöllä:

$$LAI(pca) = \beta L = 2 \int_0^{\pi/2} LG_v(\theta) \sin \theta d\theta \quad (9)$$

Kaavan 9 termiä βL kutsutaan versosiluettialaindeksiksi (SSAI, engl. shoot silhouette area index). (Stenberg ym. 1994b).

LAI-2000-laitteen tuloksia analysoitaessa on huomioitava, että perusyksikön valinnan lisäksi joudutaan tekemään muitakin yksinkertaistavia oletuksia. Lehdet (neulaset) ovat ryhmittyneet

latvuksiin, joten ehto latvustoelementtien satunnaisesta jakautuneisuudesta ei täyty. Mitä suurempaa ryhmittymisen on, sitä suurempi aliarvio saadaan optisilla menetelmillä. Lisäksi myös rungoilla ja oksilla on havaittu olevan vaikutusta latvuston läpäisevyyteen, jolloin niitä ei voida jättää tarkastelun ulkopuolelle (Deblonde ym. 1994). Epäsuorilla menetelmillä, kuten LAI-2000-laitteella, saatava estimaatti on todellista lehtialaindeksiä pienempi efektiivinen lehtialaindeksi (Chen & Black 1991). LAI-2000-laite ei siis huomioi kasvillisuudessa havaittavia ryhmittymiä ja olettaa kaiken havaitsemansa vihreäksi biomassaksi. Menetelmän taustaoletusten ollessa osin ei paikkaansa pitäviä, laitteella saatavissa lehtialan estimaateissa on jo lähtökohtaisesti virhettä. Nilsonin (1999) mallin avulla LAI-2000-laitteen tuottamia estimaatteja on kuitenkin mahdollista korjata, sillä malli tarvitsee toimiakseen tavallisimpien inventointitietojen lisäksi kohtuullisen helposti mitattavia/estimoitavia parametritietoja (Stenberg ym. 2003). Nilsonin (1999) mallin kaavat perustuvat oletukseen, että puut ovat jakautuneet metsään satunnaisesti. Malliin perustuva algoritmi kasvattaa LAI -estimaattia, kunnes se vastaa mitattuja aukkoisuusarvoja. Kun tiedetään puiden latvusmuoto, voidaan neulasten ryhmittymisen latvuksiin huomioida, ja näin korjata saatavaa lehtialaindeksiestimaattia.

Metsikkötason G-funktio kuvaa ryhmittymistä, joka johtuu puiden latvusten epätasaisesta jakautumisesta tilaan sekä lehtialan epätasaisesta jakautumisesta latvustoon. Mikäli G-funktion arvojen vaihteluväli on hyvin pieni, voidaan latvusto olettaa yksittäisiä latvuksia sisältämättömäksi, sameaksi väliaineeksi. Mitä suurempi on G-funktion arvojen vaihteluväli, sitä enemmän latvustossa on aukkoja ja latvuksista aiheutuvia tihentymiä. Näiden aukkojen sijainti voi parhaimmillaan olla lajityypillinen ominaisuus (kuten latvusmuoto), jonka avulla puulajit voidaan erottaa toisistaan. Lehtien (neulasten) orientaation vaikutus säteilyn sammumiseen metsikkötasolla riippuu metsikön rakenteesta ja ominaisuuksista. (Stenberg ym. 1994a.)

LAI-2000-laitteella saadaan luotettavia tuloksia, kun sääolosuhteet pysyvät mittausten ajan vakaina. Paras mahdollinen sää estimointiin on tasaisen pilvinen taivas. Myös iltahämärässä ja aamunkoitteessa voidaan laitteella saada hyviä tuloksia, koska suora auringonvalo ei yllä laitteen uloimmalle kehälle auringon korkeuskulman ollessa alle 16 astetta. Auringon suunnan ja pilviolosuhteiden vaihtuminen kesken mittausten aiheuttaa virhettä saataviin estimaatteihin. Tätä virhettä voidaan vähentää esimerkiksi käyttämällä usean mittauksen keskiarvoa yksittäisen mittaustuloksen sijasta. LAI-2000-laitteen lisävarusteita (näkökentän

rajoittimia) voidaan käyttää kaventamaan linssin näkemää aluetta, jotta suora auringonvalo linssiin estyisi. (LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992.).

Leblanc & Chen (2001) havaitsivat LAI-2000-laitteen viidennen kehän yliarvioivan latvuston aukkoisuutta kuusikoissa potentiaalisesti eniten, sillä vähäinenkin säteilyn sironna lehvästöstä saattaa aiheuttaa suhteellisen suuria virheitä tuloksiin. Tällä havainnolla on merkitystä erityisesti varttuneilla ja suuren lehtialan omaavilla aloilla, joilla viides kehä on yleensä kehistä vähiten aukkoisin. Samassa tutkimuksessa todettiin kahden pienimmän kehän olevan herkimpiä sääolosuhteissa tapahtuville muutoksille (Leblanc & Chen 2001). Heidän mukaansa jopa vain neljännen kehän käytöllä voitaisiin päästä riittävän tarkkoihin tuloksiin, sillä sääolosuhteissa tapahtuvat muutokset eivät juuri vaikuta neljännen kehän saamaan arvoon. Viidennen kehän poissulkemista tarkastelusta voidaan myös pitää perusteltuna, jos vanhoilla ja suuren LAI:n omaavilla aloilla viidettä kehää hallitsevat oksat ja rungot varsinaisen lehtialan asemasta (Solberg ym. 2009). Viides kehä voidaan jättää pois tarkastelusta myös koealan ulkopuolisen puuston vaikutuksen eliminoimiseksi (kuva 4). Viidennen kehän jättäminen tarkastelun ulkopuolelle ei kuitenkaan voida pitää suositeltavana, sillä laitteen toiminta perustuu arvojen laskentaan ylemmän puoliavaruuden yli. Stenbergin ym. (1994b) männiköissä tehdyissä tutkimuksissa havaittiin kuitenkin, että lehtialaindeksi muuttui vähemmän kuin 5 prosenttia puolella aloista ja puolella aloista se lisääntyi 9 – 13 prosenttia, kun viides kehä suljettiin pois tarkastelusta.

1.2.4 Latvusmuodon kehittyminen

Latvusmuoto ja -koko määrittävät tilavuuden, johon latvustoelementit jakautuvat. Latvustoelementtien jakautuminen taas vaikuttaa sekä säteilyn sammumiseen että latvuksesta tapahtuvaan heijastukseen. Latvusmuodon vaikutusta G-funktion muotoon täytyy tarkastella teoreettisten simulointien avulla, jotta muiden tekijöiden vaikutus saadaan eliminoitua. Latvusmuotoa ja -tilavuutta voidaan käyttää hyväksi myös fysikaalisissa heijastusmalleissa (esimerkiksi Kuusk & Nilson 2000), sillä latvusmuoto ja -tilavuus vaikuttavat metsiköistä (latvuksista) takaisin heijastuvan säteilyn määrään ja suuntajakaumaan. Heijastusmallit toimivat rajapintana optisten kaukokartoitusaineistojen ja maastosta kerättävän referenssiaineiston välillä, sillä niiden avulla on mahdollista esittää, mitkä metsikön ominaisuudet vaikuttavat takaisin sensoriin heijastuneen säteilyn määrään. Lisäksi

latvusmuoto (ja -tilavuus) vaikuttaa aluskasvillisuudesta ja maaperästä heijastuvan säteilyn määrään. (esimerkiksi Rautiainen ym. 2004.)

Perinnölliset tekijät ohjaavat latvusten kehitystä kohti lajityypillistä latvusmuotoa. Puiden latvusmuodon kehitys on kuitenkin joustavaa. (Horn 1971.) Havupuiden latvusmuoto on tyypillisesti kartiomainen. Havupuiden kerroksellinen rakenne ja neulasten ryhmittäminen versoihin mahdollistaa valon pääsyn syvälle latvukseen (Horn 1971). Kuuluvaisen (1992) mukaan latvuksen pituus on latvuksen leveyttä tärkeämmässä asemassa valokilpailun suhteen pohjoisilla leveysasteilla. Keskimääräisillä leveysasteilla latvuksen muodolla ei ole interseption kannalta suurta merkitystä, sillä lehtien määrä ja jakautuminen tilaan (latvuksen sisäinen lehtialatiheys) vaikuttavat voimakkaasti interseptioon (Wang & Jarvis 1990). Puuyksilön käytössä olevien kasvuresurssien määrään vaikuttavat lisäksi puun koko sekä metsikön muiden puiden tiheys ja tilajärjestys (Nikinmaa 1992).

Männyn latvus kilpailee pääosin valosta, ja sen latvuksen on havaittu kasvavan kuusen latvusta nopeammin (Nilson & Gemmel 1993). Männylle on ominaista vallata kasvutilaa latvusta kasvattamalla, mutta metsikön tiheyden lisääntyessä latvukset joutuvat supistumaan kasvutilan vähentyessä (Jack & Long 1991a). Kilpailu vedestä ja ravinteista lienee kuusen kohdalla valokilpailua suurempaa (Nilson & Gemmel 1993, Deleuze ym. 1996). Kuusen apikaalidominanssi (päärangan/silmujen hormonivaikutus) heikkenee varjossa, jolloin sekä läpimitan että pituuden kasvu vähenevät (Ottorini 1991, Nilson & Gemmel 1993). Varjostuksen on havaittu vaikuttavan neulasmassan jakautumiseen (Kellomäki & Oker-Blom 1983). Puuston pituuden ja tiheyden (varjostuksen) lisääntyessä neulasmassan painopiste nousee rungolla ylemmäksi (Kellomäki ym. 1980). Männyt säilyttävät neulasensa 3-6 vuotta. Neulaset pysyvät oksissa pohjoisen kovissa aloissa kauemmin kuin etelän suotuisemmissa oloissa. (Stenberg ym. 1994a.) Hakkilan (1991) tutkimuksessa Etelä-Suomessa kasvavilla männyllä neulaskertoja on noin 3,5 ja Pohjois-Suomessa noin 4,8. Etelä-Suomessa kasvavilla kuusilla neulaskertoja on 7,4 ja Pohjois-Suomessa kasvavilla noin 10,7 (Hakkila 1991). Kuusen latvussuhde on keskimäärin noin 80 prosenttia ja männyn noin 55 prosenttia (Hakkila ym. 1972). Latvussuhteen on havaittu pienenevän puun varttuessa (Hynynen ym. 2002). Kuusen latvusmassa on kaikissa kehitysluokissa noin kaksinkertainen männyn latvusmassaan verrattuna. Kuusileimikoissa kokonaislatvusmassaa kertyy keskimäärin 150 - 200 kilogrammaa (latvusmassaa voi olla jopa 300 kilogrammaa) kuivamassaa kuorellisen

rungon kuutiometriä kohti. Männyn latvuksen kuivamassa jää noin 80 - 160 kilogrammaan rungon kuutiometriä kohti. (Hakkila 1991.)

Männyn oksikkuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat muun muassa puuston tiheys, läpimittajakauma ja kasvupaikka. Ravinteikkaalla paikalla kasvaessaan männyn kehittyvät oksikkaammiksi kuin vähäravinteisella paikalla kasvaessaan (Kellomäki & Väisänen 1986). Rudnickin ym. (2004) mukaan pituudeltaan alle 12 metristen metsiköiden lateraalinen kasvu riippuu puuston tiheydestä ja ympäristöolosuhteista. Sen sijaan pituudeltaan yli 15 metristen metsiköiden pääasiallisimmaksi latvusten lateraalista kasvua rajoittavaksi tekijäksi muodostuu latvusten välinen mekaaninen rasitus (Rudnick ym. 2004). Latvuston sulkeuduttua puiden rungot alkavat solakoitua, jolloin latvusten välisten kontaktien määrä kasvaa (Rudnick ym. 2003). Lyhyt kasvukausi, yhdessä hitaan kasvuvauhdin kanssa, vaikeuttaa näiden kulumien korjaamista, jonka vuoksi boreaalisten metsien latvukset ovat tyypillisesti toisistaan erillään. (Rudnick ym. 2004.) Näiden havaintojen avulla voidaan selittää sekä pohjoisten metsien tuottavuuden huomattava aleneminen puuston vanhetessa (Gower ym. 1996) että ryhmittyneimpien latvusten löytyminen nimenomaan boreaalisista havumetsistä (Kucharik ym. 1999). Kuusen latvusten arkkitehtuuri on geneettisesti määräytynyttä, mutta muutokset elinympäristössä voivat laukaista tarpeen mukautua muuttuneeseen tilanteeseen. Kuusella on kyky luoda erilaisia latvustyyppisiä (comb-, brush-, plate -tyypit sekä näiden välimuototyyppit), jotka eroavat fenotyypiltään. (Geburek ym. 2008.) Tiheässä kasvaneet männyn ovat vähäoksisempia kuin harvassa kasvaneet männyn, joten tiheyden kasvun voidaan todeta pienentävän männyn latvusprojektiota (Kellomäki & Väisänen 1986). Koska metsikön tiheys vaikuttaa männyn elävän latvuksen pituuteen ja leveyteen, ovat myös latvuksen keskitilavuus ja keskimääräinen latvuksen pinta-ala metsikön tiheydestä riippuvia (Jack & Long 1991b).

Ervastin (2006) tutkimuksessa männyn latvusten havaittiin olevan kuusten latvuksia kartiomaisempia, sillä kuusten latvukset ovat epäsäännöllisemmän muotoisia. Verrattaessa muutamaa tyypillisintä latvuksen tilavuuden laskentaan käytettyä latvusprojektiota (kartiota, ellipsoidia sekä kartiota + sylinteriä), havaittiin kartion aiheuttavan molemmille puulajeille suurimmat tilavuuden aliarviot. Kahdella muulla latvusprojektiolla lasketut tilavuudet olivat lähempänä todellisia tilavuuksia. Latvusten tilavuuden mallinnukseen kannattaa siis valita ellipsoidi, sillä se sopii molemmille puulajeille, ja vaatii latvuksen pituuden lisäksi tiedon latvuksen pisimmästä säteestä (Ervasti 2006).

1.3 Tutkimustehtävän rajaus

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää vaihteleeko G-funktion muoto eri puulajien metsiköissä, ja voidaanko puulajit erottaa toisistaan G-funktion muodon avulla. Arvioin lisäksi G-funktioiden muodossa kasvukauden aikana tapahtuvia muutoksia. Muita tutkimuksen kannalta mielenkiintoisia kysymyksiä olivat, voidaanko ryhmittymistä tai latvusmuotoa arvioida G-funktion muodon avulla.

Tutkimukseni jakautuu kahteen osaan. Ensimmäisessä osassa tarkastelen männyn (*Pinus sylvestris*), kuusen (*Picea abies*) ja koivun (*Betula pendula*) puulajikohtaisia G-funktioita mittaamani maastoaineiston perusteella. Toisessa osassa tarkastelen teoreettisten simulointien avulla latvuksen dimensioiden (latvuksen pituus ja säde) ja sisäisen ryhmittäisyyden vaikutusta puulajikohtaiseen G-funktioon. Lopuksi yleistän tutkimustuloksia ja pohdin, kuinka tutkimukseni on osaltaan viemässä kehitystä eteenpäin.

2. Materiaali ja menetelmät

2.1 Maastomittaukset

2.1.1 Intensiivialojen kuvaus

Tutkimusalueena oli Hyytiälän metsäaseman (68°59`N, 35°72`E) ympäristö, jonka metsät edustavat tyypillistä boreaalista havu- ja lehtimetsää. Tutkimusta varten perustettiin kuusi yhden puulajin koealaa, kaksi kutakin puulajia kohden. Tutkittavat puulajit olivat mänty, kuusi ja koivu. Koealaparit valittiin niin, että kullekin puulajilla oli varttuneesta metsästä ja taimikosta muodostuva pari tai vaihtoehtoisesti tiheämpi ja harvempi koeala. Nämä parit pyrittiin valitsemaan niin, että sekä tiheimmät (varttuneemmat) koealaparit että harvemmat (taimikot) koealaparit ovat puustotunnuksiltaan toisiaan vastaavia yhden puulajin (alle 10 prosenttia muita puulajeja) koealoja. Koealoille perustettiin 81 mittauspistettä sisältävä mittaushila, jossa kunkin pisteen aukkoisuustiedot mitattiin. Mittauspisteiden välinen etäisyys

oli neljä metriä. Mittaushilani linjat kulkivat etelästä pohjoiseen ja pohjoisesta etelään. Linjan mittaamisen jälkeen siirryttiin yksi linjaväli itään seuraavan linjan alkuun.

Nuoren kuusikon ja männikön tiheys arvioitiin käyttäen 3,99 metrin vapaa. Ympyräkoelat otettiin mittaushilan keskipisteestä (kokonainen ympyräkoela) sekä koealan nurkista (muodostui yksi ympyräkoela) sekä reunojen keskipisteistä alalle päin (muodostui kaksi kokonaista ympyräkoelaa). Tiheän ja harvan koivikon pohjapinta-ala arvioitiin relaskoopin pienemmällä, kahden senttimetrin hahlolla (metrin mittainen varsi). Relaskooppikoelat otettiin mittaushilan keskipisteestä (kokonainen relaskooppikoela) sekä koealan nurkista (muodostui yksi relaskooppikoela) sekä reunojen keskipisteistä alalle päin (muodostui kaksi kokonaista relaskooppikoelaa). Varttuneen kuusikon ja männikön tiheys mitattiin samoin kuin koivikoiden, mutta relaskoopissa käytettiin suurempaa neljän senttimetrin hahloa. Nuori kuusikko ja männikkö erosivat toisistaan lähinnä puuston tiheyden perusteella, sillä keskimääräinen rinnankorkeusläpimitta ja pituus olivat hyvin lähellä toisiaan. Myös tiheä ja harva koivikko olivat keskitunnuksiltaan hyvin lähellä toisiaan, ja suurin eroavaisuus koealojen välillä oli puuston pohjapinta-alassa. Varttunut kuusikko ja männikkö sen sijaan erosivat kaikkien puustotunnusten suhteen toisistaan, sillä puulajien väliset erot kasvavat puuston vanhetessa (taulukko 1). Koealoiksi pyrittiin valitsemaan luonnollisia ja mahdollisimman puulajityypillisiä, yhden puulajin metsiköitä.

Taulukko 1. Koealojen perustiedot. Koealaparit olivat tärkeimpien puustotunnusten suhteen vertailukelpoisia ja kasvatustiheydeltään ikäluokkansa ja puulajinsa tyyppillisiä edustajia.

Koeala	KKJ (N)	KKJ (E)	tarkkuus	h (m)	d1,3 (cm)	keskeltä	kulmista	reunoilta
Varttunut männikkö	6856569	2517189	+/- 3 m	18,7	23,7	26 ppa	26 ppa	31 ppa
Nuori männikkö	6856184	2517454	+/- 4 m	7,5	9,9	5400 p/ha	5000 p/ha	5400 p/ha
Varttunut kuusikko	6858640	2516881	+/- 4 m	24,6	30,2	49 ppa	61 ppa	57 ppa
Nuori kuusikko	6861584	2516424	+/- 3 m	7,1	9,2	2000 p/ha	3000 p/ha	3000 p/ha
Tiheä koivikko	6859635	2516744	+/- 3 m	14,8	18,3	20 ppa	26,5 ppa	22,2 ppa
Harva koivikko	6859724	2516724	+/- 3 m	13,6	16,3	16,5 ppa	18 ppa	12,5 ppa

Metsikön tilajärjestyksen teoreettiseksi malliksi valittiin Poissonin satunnaisjakauma, jossa puun sijainnilla ei vaikusta koealan muiden puiden sijaintiin (Oker-Blom 1986). Latvusten ”Poisson -säde” laskettiin käyttäen hyväksi tietoa koealan runkoluvusta ja latvuspeitosta (katso yhtälöt 11 ja 13). Latvuksen muotosuhde ($h_{latvus}/r_{Poisson}$) oli suurin nuoressa

kuusikossa (6,78). Toiseksi suurin latvuksen muotosuhde on harvassa koivikossa (6,47) ja kolmanneksi suurin nuoressa männikössä (6,35). Pienin latvuksen muotosuhde on tiheässä koivikossa (5,11). Varttuneen kuusikon latvuksen muotosuhde (5,47) on pienempi kuin varttuneen männikön (5,71). Latvusten muotosuhteiden pohjalta voidaan todeta varttuneiden koealojen ja tiheän koivikon latvuksien olevan sulkeutuneempia kuin nuoremmilla koealoilla ja harvassa koivikossa (taulukko 2). Latvuksien muotosuhteet ovat siis kaikilla koealoilla varsin realistiset, sillä latvukset alkavat sulkeutua, ja latvuksen muotosuhde vähentyä, metsikön kehityksen edetessä (vapaan kasvutilan vähentyessä).

Taulukko 2. Koealoittaiset parametrien arvot. Lyhenteet: runkoluku (n), elävän latvuksen Poisson -säde (r_Poisson), elävän latvuksen pituus (h_latvus), latvuspeitto (l_p), lehtialaindeksi (LAI), elävän latvuksen tilavuus (V), latvussuhde (h_latvus/r_Poisson).

Koeala	n (m ⁻²)	r_Poisson	h_latvus	l_p (%)	LAI	V (m ³)	h_latvus/r_Poisson
Varttunut männikkö	0,06	1,73 m	9,90 m	43	1,29	31,16	5,71
Nuori männikkö	0,53	0,59 m	3,73 m	44	1,51	1,35	6,35
Varttunut kuusikko	0,07	2,47 m	13,52 m	73	3,51	86,64	5,47
Nuori kuusikko	0,27	0,98 m	6,66 m	55	2,15	6,72	6,78
Tiheä koivikko	0,09	2,10 m	10,75 m	70	2,58	99,72	5,11
Harva koivikko	0,08	1,99 m	12,85 m	61	2,14	106,08	6,47

2.1.2. VALERI -alojen kuvaus

VALERI -verkosto perustettiin vuonna 2000 eurooppalaisen yhteistyön ja Ranskan avaruusjärjestön CNES:in tuella kehittämään satelliittikuvien tulkintamenetelmiä kasvillisuuspeitteen, lehtialan ja yhteyttämiseen käytettävissä olevan säteilyn määrän arvioimiseksi. Verkoston ideana on tuottaa korkean spatiaalisen resoluution omaavia karttoja biofysisistä muuttujista. Satelliittikuvista arvioitujen kasvillisuustunnusten validoinnissa käytetään eri puolilta maailmaa kerättyä maastomittausdataa. (<http://w3.avignon.inra.fr/valeri/>). Hyytiälä on yksi VALERI -verkoston koealoista. Hyytiälän VALERI -alojen mittaushila käsitti 12 mittauspistettä. Mittauspisteet oli jaettu kahdelle linjalle, jotka leikkasivat toisensa kohtisuorasti linjojen keskeltä. Linjat kulkivat etelästä pohjoiseen ja idästä länteen. Mittauspisteet myös mitattiin tässä järjestyksessä. VALERI -alat oli tarkoitus mitata kahden viikon välein. Valitsin jatkotarkasteluun seitsemän alaa, jotka vastaavat mahdollisimman hyvin intensiivialojani (taulukko 3). VALERI -alat

eivät olleet yhtä puhtaita yhden puulajin metsiköitä kuin intensiivialat. Muuta puustoa oli kuitenkin vähemmän kuin 20 prosenttia.

Taulukko 3. VALERI -alojen perustiedot.

	lyhenne	KKJ(N)	KKJ(E)	keskikesän LAI
Varttunut männikkö	A4	6861169.4	2515257.3	1,55
Nuori männikkö	U2	2517443.8	6856188.0	1,33
Varttunut kuusikko	E7	6860335.7	2516347.9	3,9
Nuori kuusikko	B2	6861578.3	2516451.5	2,31
Tiheä koivikko	H5	6860091.4	2516510.2	2,79
Harva koivikko	H3	6859665.7	2516744.1	2,61
Melko tiheä koivikko	U16	6858594.7	2516093.1	2,72

2.1.3. LAI-2000 -mittaukset

Mittaukset suoritettiin kahdella LAI-2000 Plant Canopy Analyzer -laitteella. Laitteet kalibroitiin ohjekirjan (LAI-2000 Instruction manual) mukaan aina ennen mittausten aloitusta. Referenssilaitte sijoitettiin joko peltoaukean keskelle (jalustalle) tai SMEAR II -mittausaseman (www.atm.helsinki.fi/SMEAR) tornissa olevaan kiinnikkeeseen. Referenssilaitetta kiinnitettäessä tarkastettiin, että referenssisensori oli vaaterissa. Referenssilukemien mittaussväli oli säädetty 15 sekuntiin. Näkökentän rajoitinta ei käytetty kesän mittauksissa. Taivasolosuhteiden tuli pysyä mahdollisimman muuttumattomina laitteen kalibroinnin ja mittausten aikana. Paras sää mittaamiseen oli pilvetön taivas auringon korkeuskulman jäädessä alle 16 asteen. Mittauksia tehtiin myös taivaan ollessa tasaisen pilvinen. Jokainen koeala pyrittiin mittaamaan kahden viikon välein ajalla 3.5.2010 – 30.9.2010. Molempien LAI-2000-laitteiden tiedostot yhdistettiin ohjekirjan mukaisesti, ja tulostiedostot purettiin FV-2000-ohjelmalla. Laitteen tulosteesta koealoille saatiin aukkoisuus -arvot ja LAI. LAI-2000 -laitteen tuottamista aukkoisuus -arvoista ($T(\theta)$) saadaan laskettua G-funktio:

$$G_p(\theta) = -\ln T(\theta) \cos(\theta) / L \quad (10)$$

jossa L on mitattu lehtialaindeksi.

2.2 Teoreettiset simuloinnit

Simulointien tarkoituksena oli tutkia kuinka latvusmuoto ja latvuksen sisäinen ryhmittyminen vaikuttavat koealakohtaisten G-funktioiden muotoon. Simuloinnit tehtiin käytteen hyväksi tietoa koealojen puustotunnuksista, lehtialasta ja runkoluvusta. Puiden jakautuminen tilaan (maan päällä) oletettiin satunnaiseksi (Poisson). Parametrit, joiden vaikutusta simuloinneissa tutkittiin, olivat latvuksen pituus ja leveys sekä verson sammumiskertoimen arvo (G_v).

Latvusmuotoa estimoitiin käyttäen hyväksi latvusprojektioita. Latvusmuodon vaikutusta G-funktion muotoon tarkasteltiin vertaamalla koealoittaisia mitattuja G-funktiota koealojen teoreettisiin G-funktioihin. Mitattu G-funktio (laskettu kaavan 10 avulla) ei vastaa teoreettista G-funktiota, sillä LAI-2000-laitteen oletus latvustoelementtien satunnaisesta jakautumisesta ei täyty (lehdet/neulaset ovat ryhmittyneet latvuksiin). Koska metsikön todellista G-funktiota ei voitu estimoida, G-funktioita voitiin verrata toisiinsa ainoastaan muotonsa puolesta.

Simulointi tehtiin kuudennen kierroksen mittauksen pohjalta (26.–27.7.2010, vuodenväli 206/207), sillä tuolloin kaikki koealat oli mitattu peräkkäisinä päivinä ja lehtialaindeksi oli suurimmillaan. Ensimmäisessä vaiheessa jokaiselle koealan pisteelle laskettiin oma latvuspeitto -arvo, ja näiden yksittäisten arvojen keskiarvona saadaan laskettua koealoittainen latvuspeittoprosentti.

Kun metsikön teoreettiseksi tilajärjestykseksi valittiin Poissonin satunnaisjakauma, saatiin johdettua kaavan 3. vastine Poisson metsälle (Oker-Blom 1986):

$$T(\theta) = \exp(-nP(\theta)) \quad (11)$$

jossa $T(\theta)$ on latvuston valonläpäisevyys (aukkoisuus), n runkoluku ja $P(\theta)$ yksittäisen latvuksen projektioala vaakatasolla.

Metsikkökohtainen G-funktio (G_p) saatiin yhdistämällä kaavat 10 ja 11:

$$G_p(\theta) = P(\theta) \cos\theta / (L/n) \quad (12)$$

jossa $P(\theta)$ laskemiseksi tarvittiin tietoa latvuksen säteestä ja latvusmuodosta.

Kun latvukset oletettiin poikkileikkaukseltaan ympyränmuotoisiksi, voitiin latvuksen säde (r) laskea seuraavasti (perustuen kaavaan 11):

$$r = \sqrt{1/(n\pi)(-\ln(1-(l_p)))} \quad (13)$$

Latvuspeitto l_p approksimoitiin suureella $1-T(\theta)$, jossa aukkoisuustietona käytettiin LAI-2000-laitteen pienimmän zeniittikulman arvoa. Latvuspeittoa laskettaessa oletettiin, ettei yksittäisten latvusten sisällä ole aukkoja. LAI-2000-laite kuitenkin mittaa myös latvusten sisäisiä aukkoja. Koska tarkempaa tietoa ei ollut saatavissa, approksimoitiin latvuspeittoa LAI-2000-laitteen aukkoisuusestimaattien avulla.

Koivujen latvusmuotoa approksimoitiin ellipsoidina. Mänty- ja kuusialojen kohdalla verrattiin ellipsoidin ja ympyräkartion tuottamia G-funktioita. Tarkoituksena oli selvittää, kumpi approksimaatio vastaa paremmin koealojen mitattuja G-funktioita. Ellipsoidi ja ympyräkartio valittiin tarkasteluun, sillä ne edustavat kahta varsin erilaista latvusmuotoa, jotka ovat kuitenkin helposti laskettavissa (esimerkiksi Nilson 1999).

Latvuskuoren projektioalan $S(\theta)$ laskenta suoritettiin viidessä eri zeniittikulmassa, jotka vastaavat LAI-2000-laitteen kehien keskiarvoja. Käytetyt zeniittikulmat olivat: 7° , 23° , 38° , 53° ja 68° .

Latvuskuoren projektioala laskettiin ellipsoidille:

$$S(\theta) = \pi r^2 \sqrt{1 + (h/(2r))^2 \tan^2 \theta} \quad (14)$$

jossa h on latvuksen pituus ja r latvuksen säde. (Nilson 1999)

Latvuskuoren projektioala laskettiin ympyräkartiolle:

$$S(\theta) = r^2 \left\{ \left[(h/r)^2 \cot^2 \alpha - 1 \right]^{1/2} + \pi - \arccos[(r/h)\tan \alpha] \right\} \quad (15)$$

jossa α -kulma kuvaa θ -kulman vastakulmaa ($90 - \alpha = \theta$). Ympyräkartion kaava on πr^2 , kun $\tan \alpha \geq h/r$. (Oker-Blom & Kellomäki 1982b)

Säteilyn kulkema matka latvuksen läpi $s(\theta)$ approksimoitiin jakamalla latvuksen tilavuus latvuskouren projektioalalla kyseistä suuntaa vasten kohtisuoralla tasolla. Tämä laskettiin kaikille viidelle zenittikulmalle:

$$s(\theta) = V / (S(\theta) \cos \theta) \quad (16)$$

Latvuksen läpäisevyyttä C_{tr} laskettaessa runkoluku n ja lehtialaindeksi L pysyivät vakioina. Sekä runkoluku että lehtialaindeksi perustuivat maastomittauksiin. Latvuksen tilavuus sen sijaan vaihtelee latvuksen pituuden ja leveyden sekä käytetyn muotokuoren johdosta. Latvuksen lehtialatiheys vaihtelee tilavuuden muuttuessa.

$$C_{tr}(\theta) = e^{-G(\theta)s(\theta)(L/(nV))} \quad (17)$$

jossa $L/(nV)$ kuvaa lehtialatiheyttä yksittäisen latvuksen sisällä.

Näiden tietojen avulla saatiin laskettua $P(\theta)$:

$$P(\theta) = S(\theta)(1 - C_{tr}(\theta)) \quad (18)$$

Laskennoissa käytetyt koaloittaiset parametrit on kuvattu taulukossa 2. Normaalitilannetta simuloitaessa oletettiin, että latvusten sisäinen G_1 on 0,5 ja että neulaset/lehdet olivat pallomaisesti orientoituneet. Havupuille oletus (että $G = 0,5$) on virheellinen, sillä neulaset ovat ryhmittyneet versoihin. Latvuksen sisäistä ryhmittymistä testattiin vaihtamalla simuloidun G -funktion G_1 -arvo lähemmäs G_v -arvoa. Vertailu perustui siis kaavaan $G_v = \beta G_1$, jossa β kuvaa verson itsevarjostusta. Testaus suoritettiin β :n arvolla 0,6, joka vastaa $STAR_{mean}$ arvoa 0,15. Tuotettuja latvuskohaisia G -funktioita verrattiin koaloittaisiin mitattuihin G -funktioihin. Mitattu G -funktio ei kuitenkaan vastaa metsikön todellista G -funktioita, sillä LAI-2000-laitteen oletus lehtien (neulasten) satunnaisesta jakautumisesta ei täyty todellisissa metsissä.

Projektioaloja laskettaessa tulee havaita, että approksimointia tehtiin vain puiden latvuksille. Laskennassa käytetyt LAI-2000-laitteen lehtiala -estimaatit kuitenkin sisälsivät myös puiden rungot ja oksat, joten tuloksissa on lähtökohtaisesti virhettä. On myös hyvä muistaa, että

borealisissa metsissä latvusten väliin jää aukkoja. Näiden aukkojen kautta metsän pohjalle pääsee runsaasti valoa, vaikka latvukset oletettaisiin valoa läpäisemättömiksi (ei todellinen tilanne) (Nilson 1999). Käytännössä tämä tarkoittaa, että metsikön aukkoisuus (ja laitteen tuottama lehtialaestimaatti) pysyisi lähes samana vaikka latvuksissa olisi kaksi kertaa enemmän lehtiä. LAI-2000-laitteen mittaamien aukkoisuus -arvojen pohjalta ei siis voida laskea todellista metsän lehtialaindeksiä, niin kauan kuin käytetty malli on puutteellinen (Nilson 1999).

3. Tulokset

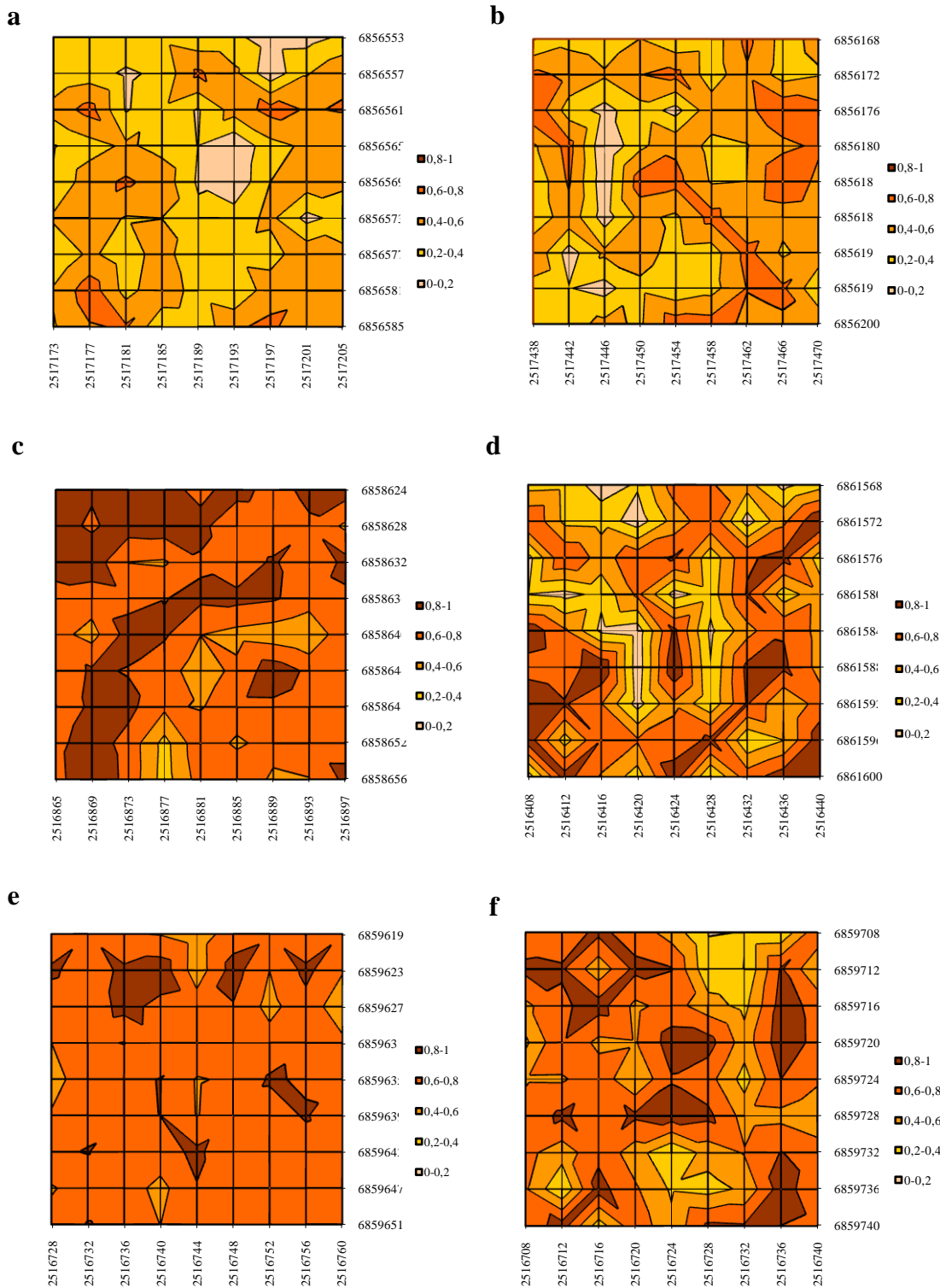
3.1. Intensiivialojen latvuspeitto

Aluksi intensiivikoealopareja vertailtiin toisiinsa latvuspeiton avulla. Latvuspeiton tarkastelun tarkoituksena oli havainnollistaa latvuspeittävyuden spatiaalista vaihtelua koealoilla. Latvuspeitto laskettiin pienimmän kehän (keskikulma 7 astetta) aukkoisuusarvoista ($1-T(\theta)$), sillä latvuspeittoa katsotaan zeniitin suunnasta. Latvuspeiton tarkastelu suoritettiin 31.5 – 8.6.2010 (vuodenpäivät 151 - 158) tehtyjen mittausten pohjalta.

Varttuneen kuusikon ja männikön latvuspeitot olivat hyvin erilaiset (kuvat 5a ja c). Varttuneen kuusikon länsi- ja pohjoisosissa latvuspeitto oli suurilla alueilla yli 80 prosenttia. Kuusikon etelä- ja keskiosissa voitiin kuitenkin havaita selkeitä alueita, joilla latvuspeitto jäi alle 60 prosentin. Varttuneen männikön latvuspeitossa voitiin havaita keskellä aukko, jossa latvuspeitto oli vähemmän kuin 20 prosenttia. Keskimääräinen latvuspeitto varttuneessa männikössä vaihteli 20 – 60 prosentin välillä. Kuvista voitiin havaita pienipiirteisyyden vähenevän puuston varttuessa.

Nuoren kuusikon ja männikön latvuspeittoja verrattaessa havaittiin kuusikon suurempi latvuspeittävyys (kuvat 5b ja d). Erityisesti pienen kuusikon etelä- ja itäosissa puuston latvuspeittävyys oli enemmän kuin 80 prosenttia. Kuusikon latvuspeittävyys oli keskimäärin noin 60 - 80 prosenttia. Nuori männikkö jäi keskimääräiseltä latvuspeittävyydeltään 40 - 60 prosenttiin, ja sen länsiosassa voitiin lisäksi havaita melko avoimia kohtia, joissa latvuspeittävyys oli vähemmän kuin 20 prosenttia.

Tiheän ja harvan koivikon latvuspeittoja verrattaessa havaittiin puustotunnuksiltaan melko yhtenevien koealojen välillä selkeitä eroja (kuvat 5e ja f). Tiheän koivikon latvuspeitto oli hyvin tasainen ja koko koealalla keskimäärin 60 – 80 prosenttia. Harvan koivikon latvuspeitossa sen sijaan havaittiin selkeää vaihtelua alueiden välillä. Latvuspeitto oli monin paikoin yli 80 prosenttia, mutta toisaalta jäi paikoin alle 40 prosenttiin. Harvan koivikon latvuspeitto oli kuitenkin keskimäärin sama kuin tiheässä koivikossa.



Kuva 5. Koealoittaiset latvuspeitot. a. varttunut männikkö. b. nuori männikkö. c. varttunut kuusikko. d. nuori kuusikko. e. tiheä koivikko. f. harva koivikko.

3.2. Otoksoon vaikutus mittaustuloksiin

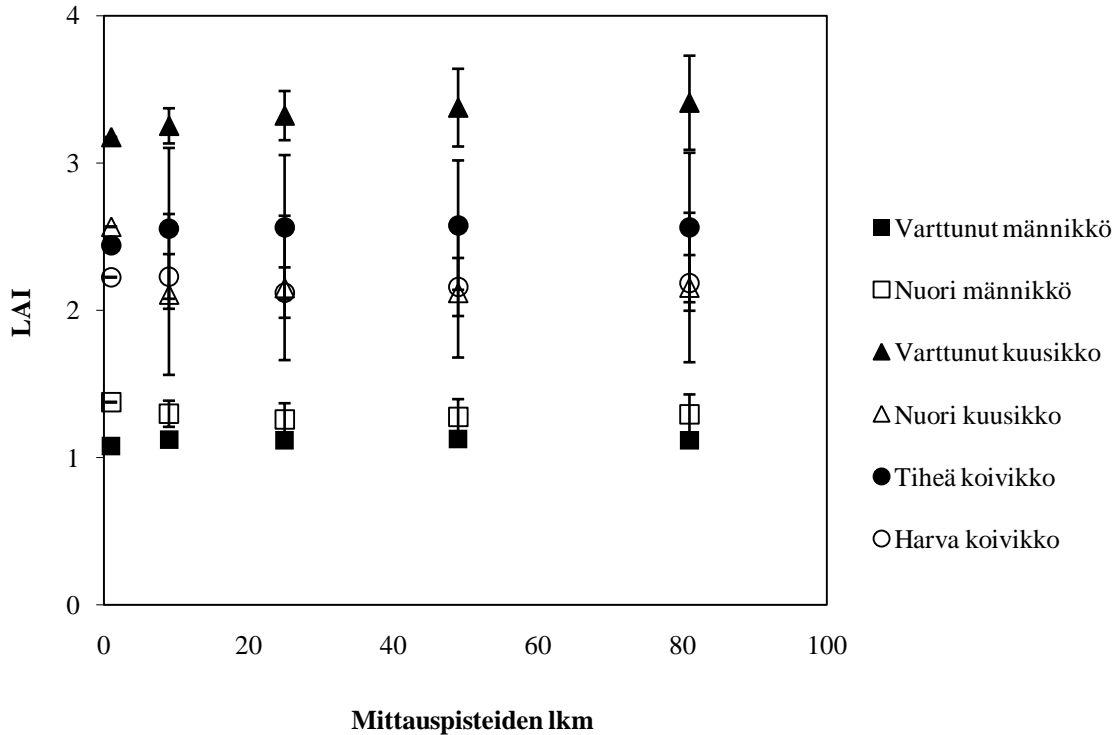
Otoksoon tarkastelu suoritettiin mittapistekohtaisten LAI -estimaattien (kaava 2) avulla. Tarkoituksena oli tutkia otoksoon vaikutusta mittaustarkkuuteen erilaisissa metsikkörakenteissa. Käytännössä otoksoon varioinnin avulla voitiin vastata kysymykseen, riittääkö pienempi otoskoko tiheässä metsikössä verrattuna harvempaan metsikköön. Otoksoon tarkastelu suoritettiin 31.5 – 8.6.2010 (vuodenpäivät 151 - 158) tehtyjen mittausten pohjalta. Otokskoko tarkasteltiin kasvattamalla neliön muotoista mittaushilaa keskipisteen ympärillä. Ensimmäisenä otoksena oli siis mittaushilan keskipisteen LAI -estimaatti. Toinen otos laskettiin 9 (3x3 mittauspistettä) keskimmäisen LAI -estimaatin aritmeettisena keskiarvona. Kolmas otos oli 25:n (5x5 mittauspistettä) ja neljäs otos 49:n (7x7 mittauspistettä) keskimmäisen LAI -estimaatin aritmeettinen keskiarvo.

Taulukko 4. Mittauspisteiden vähimmäismäärä, joka riitti tuottamaan tarkkuudeltaan 81 mittapistettä vastaavan estimaatin lehtialasta.

Koeala	otoskoko (lkm)	tarkkuus (%)
Varttunut männikkö	25	99,99
Nuori männikkö	9	100,35
Varttunut kuusikko	49	99,03
Nuori kuusikko	25	99,88
Tiheä koivikko	25	100,07
Harva koivikko	49	98,73

Tuloskaaviosta (kuva 6) näkee LAI -estimaattien hajontojen kasvavan mittauspisteiden lukumäärän kasvaessa. Lehtialaindeksi vakiintuu jo noin 20 mittapisteen kohdalla. Varttunut kuusikko ja harva koivikko tosin tarvitsivat mittapisteitä hieman enemmän lehtialaindeksi -estimaatin vakiinnuttamiseksi. Tarvittavien mittauspisteiden määrä ei vähentynyt metsikön tiheyden alentuessa. Tarvittavan tarkkuuden saavuttamiseksi riitti nuoressa männikössä 9 mittapistettä, kun varttuneessa männikössä samaan tarkkuuteen pääsemiseksi mittapisteitä tarvittiin 25 (taulukko 4). Varttuneessa kuusikossa mittapisteitä tarvittiin peräti 49, kun nuoressa kuusikossa mittapisteiden määräksi riitti liki puolet varttuneen kuusikon mittapisteiden määrästä. Koivikoissa tilanne oli päinvastainen. Tiheässä koivikossa mittapisteiden tarve oli 25, mutta harvassa koivikossa niitä tarvittiin peräti 49. Tämä ero havu- ja lehtipuiden välillä selittyi harvemman koivualan suuremmalla pienipiirteisyydellä. Mitä enemmän alalla on tiheydestä johtuvaa vaihtelua, sitä todennäköisemmin myös

tarvittava mittauspisteiden lukumäärä kasvaa. Mittaushilani koko (81 pistettä) on siis riittävän suuri tuottamaan luotettavan lahtialaindeksi estimaatin.



Kuva 6. Lehtialaindeksi (LAI) -estimaatin hajonta mittauspisteiden lukumäärän lisääntyessä. Vertikaalisilla akseleilla on kuvattu kunkin mittauspisteen lehtialan hajonnan suuruus.

3.3 LAI-2000-laitteen kehäanalyysi

Tavoitteena oli selvittää, vaikuttaako viidennen kehän poisjättäminen merkityksellisesti pistekohtaiseen LAI -estimaattiin ja voiko samoihin tuloksiin päästä käyttämällä vain neljää kehää tai vain neljättä kehää. Keskikesän (26. - 27.7., vuodenväli 206 - 207) lehtialaindeksiä tarkasteltiin mittapistekohtaisten LAI -estimaattien avulla. Nämä laskettiin kaavan 2 avulla. Koska tarkastelu tehtiin vertaamalla neljän kehän tuottamaa estimaattia kaikkien viiden kehän tuottamaan estimaattiin sekä vain neljännen kehän estimaattiin, muuttuivat laskennassa käytettyjen kehien painoarvot. Neljän kehän painoarvot olivat: 0,034, 0,103, 0,158 ja 0,705 (Stenberg ym. 1994b, suullinen tiedonanto Jon Welles`ltä). Laskettaessa LAI vain yhden kehän perusteella oli tämän kehän painoarvo 1.

Tuloksista (taulukko 5) voitiin päätellä, että sillä käytetäänkö tulosten laskentaan neljää kehää vai vain neljättä kehää, ei ole suurta merkitystä tuotettuun LAI -estimaattiin. Kun LAI laskettiin neljän kehän pohjalta, sen arvo kasvoi 5,7 prosenttia verrattuna kaikkien kehien tuottamaan estimaattiin. Jos tarkastelu suoritettiin vain neljännen kehän pohjalta, kasvoi LAI -estimaatti keskimäärin 6,5 prosenttia. LAI -estimaatin muutos oli hitainta nuoressa männikössä. Viidennen kehän poisjättäminen kasvatti LAI -estimaattia vain 0,2 – 3 prosenttia. Suurinta LAI -estimaatin muutos oli tiheässä koivikossa, jossa viidennen kehän jättäminen pois tarkastelusta kasvatti LAI -estimaattia lähes 11 prosenttia. Kun viidennen kehän jättää pois tarkastelusta koelaitainen LAI -estimaatti kasvoi varttuneilla aloilla noin 5 - 7 prosenttia, nuoressa kuusikossa 6 prosenttia ja harvassa koivikossa 5 - 6 prosenttia.

Taulukko 5. LAI -estimaattien muutos, kun laskennassa käytettiin vain osaa kehistä tai vain yhtä kehää.

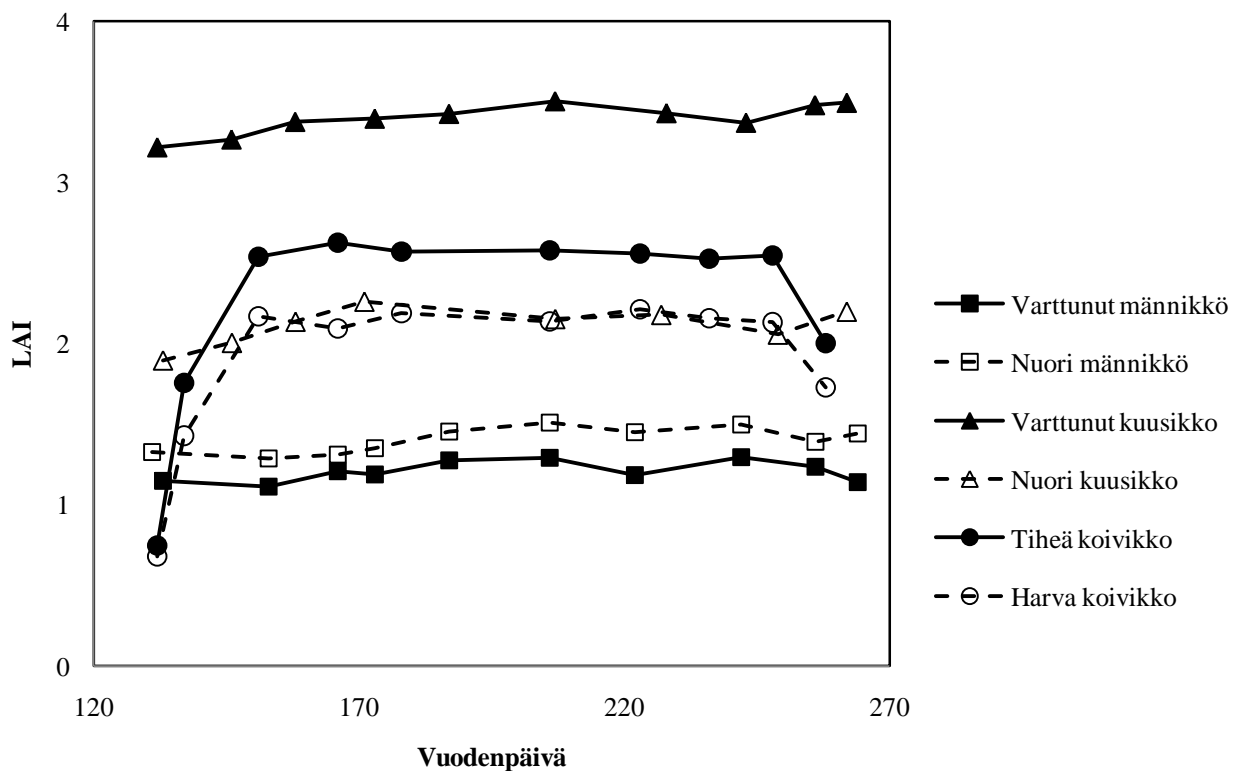
Koela	kehät 1-5	kehät 1-4	kehä 4	kehät 1-4 / kehä 4 /	
				kehät 1-5	kehät 1-5
Varttunut männikkö	1,29	1,37	1,39	1,05	1,07
Nuori männikkö	1,52	1,52	1,57	1,00	1,03
Varttunut kuusikko	3,53	3,71	3,79	1,04	1,07
Nuori kuusikko	2,16	2,30	2,29	1,06	1,05
Tiheä koivikko	2,6	2,88	2,85	1,10	1,09
Harva koivikko	2,15	2,29	2,26	1,06	1,05
LAI:n kasvu keskimäärin:				0,057	0,065

3.4 Lehtialan koelaitainen kehittyminen

Lehtialaindeksi kehittyi tasaisesti Hyytiälän alueella kesän 2010 aikana (kuva 7). Pienimmät lehtialaindeksin arvot olivat löydettävissä männiköistä. Kaikista pienin LAI -arvo oli varttuneessa männikössä. Koivikoissa LAI kehittyi tasaisesti koko kevään ja alkukesän ajan, ja kasvukaudenaikaiset muutokset olivat havaittavissa. Kuusikoissa LAI:n kehitys oli tasaisinta. Keskikesän LAI -arvot mitattiin 26. – 27.7.2010 (vuodenpäivät 206 – 207). Metsäntutkimuskeskuksen fenologiapalvelun mukaan Oriveden seudun rauduskoivujen lehdet olivat hiirenkorvalla 14.5.2010 (vuodenpäivä 134) ja täysikasvuiset 20.5.2010 (vuodenpäivä 140). (<http://www.metla.fi/metinfo/fenologia/>). Havainnot yhtenivät

mittaustulosten kanssa, sillä koivikoiden ensimmäinen mittauskerta (12.5, vuodenvä 132) sisälsi vain puiden rungot ja oksat. Toisella mittauskerralla (17.5, vuodenvä 137) lehdet olivat hiirenkorvalla ja kolmannella mittauskerralla (31.5, vuodenvä 151) ne olivat jo saavuttaneet täysikasvuisuuden.

Analyyseistä poistettiin epäonnistuneet mittaukset. Epäonnistuneina mittauksina pidettiin männiköiden toista mittauskertaa (25.5, vuodenvä 145) ja nuoren kuusikon mittauskertoja viisi (5.7, vuodenvä 185) ja kahdeksan (27.8, vuodenvä 238). Syynä oli sääolosuhteiden muuttuminen mittausten aikana.



Kuva 7. Lehtialan kehittyminen koaloilla vuodenväin suhteen.

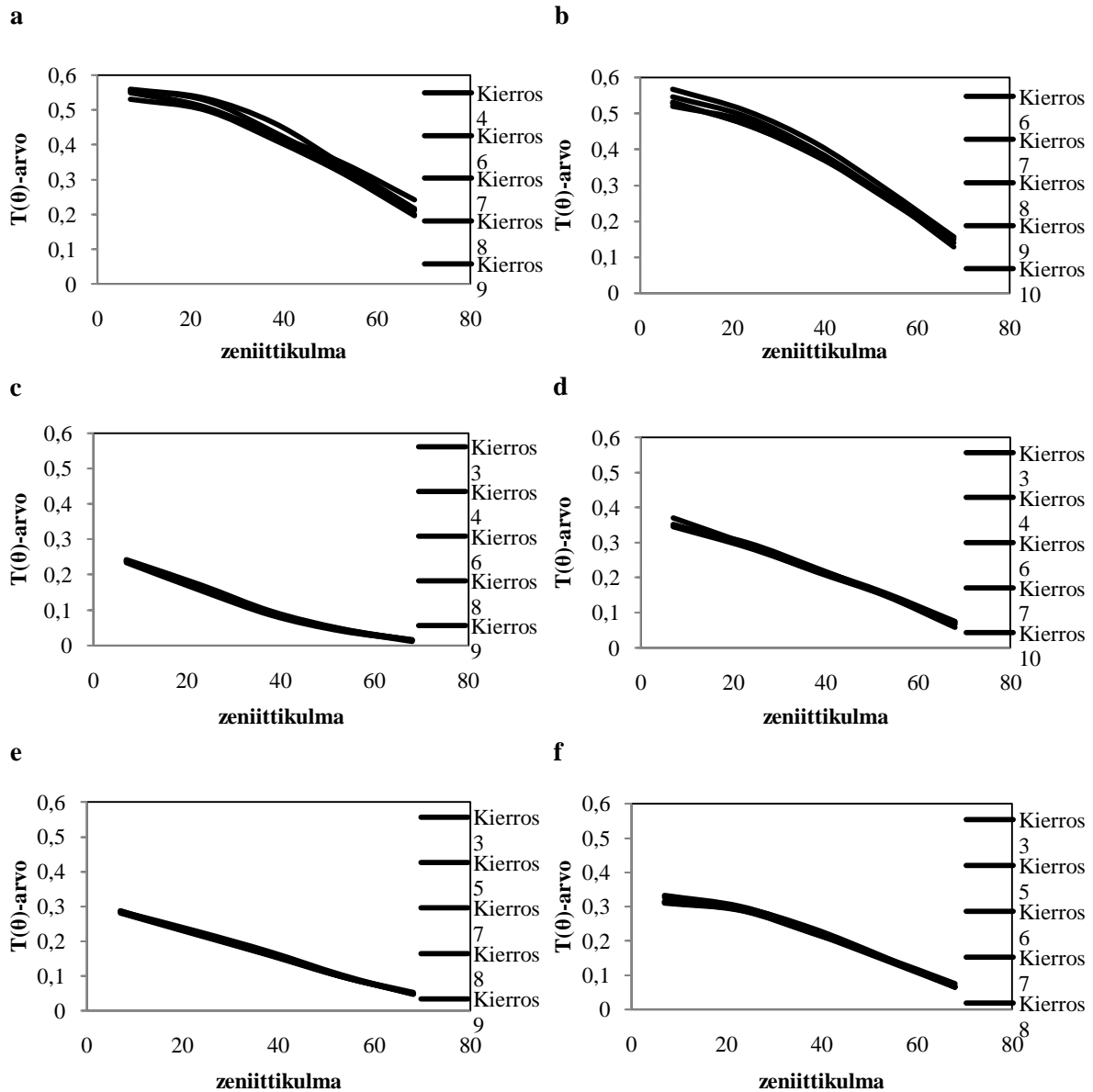
3.5 Koealoittaisten G-funktioiden tarkastelu

Koealoittaisten G-funktioiden vertailuajankohdaksi valittiin heinäkuun loppupuoli (26. – 27.7.2010, vuodenaikana 206 - 207), sillä tuolloin lehtiala oli suurimmillaan, ja koealat oli mitattu kahtena peräkkäisenä päivänä. Kuudennen kierroksen sopivuutta koealoittaisten vertailujen ajankohdaksi tarkasteltiin muun muassa lehtialaindeksin ja aukkoisuusarvojen avulla. Varsinainen koealojen vertailu suoritettiin kuitenkin vain keskikesän G-funktioille. Koealoittaiset G-funktiot poikkeavat litteän lehden/neulasen G-funktioista (kuva 2a ja b), sillä metsikkötasolla ryhmittymisen, erityisesti havupuiden versorakenne, vaikuttaa metsän sisäiseen säteilykenttään.

3.5.1 Latvuston aukkoisuuden kulmariippuvuus

Tulosten tarkastelu suoritettiin visuaalisesti kuvien avulla (kuva 8). Kuvissa oli esitetty viiden mittauskerran aukkoisuusarvot koealoittain. Tarkasteluun valittiin mittauskerrat, jotka olivat mahdollisimman samanmuotoiset ja ajallisesti kattavat. Tämä tuotti ongelman männiköissä, joissa peräkkäisten kierrosten välinen hajonta oli suurta (kuvat 8 a ja b). Lisäksi säästä johtuvilla mittausvirheillä on suhteellisen suuri vaikutus, kun LAI on pieni. Kuusikoissa (kuvat 8 c ja d) aukkoisuusarvot kehittyivät tasaisesti. Koivikoissa vuodenvaihtuksen vaikutus täytyi poistaa, jotta tyyppillinen aukkoisuusarvojen muoto pääsi esiin.

Aukkoisuusarvojen kulmariippuvuus vaikutti normaalilta, sillä aukkoisuus väheni zeniittikulman kasvaessa. Männiköiden (kuvat 8 a ja b) ja harvan koivikon (kuva 8f) aukkoisuusfunktiossa ($T(\theta)$ -funktioissa) oli havaittavissa kupuruutta. Tiheän koivikon (kuva 8e) ja nuoren kuusikon (kuva 8d) aukkoisuusfunktio vaikuttivat kulmakertoimeltaan melko suorilta. Varttuneen kuusikon (kuva 8c) aukkoisuusfunktio oli sen sijaan hieman kovera.

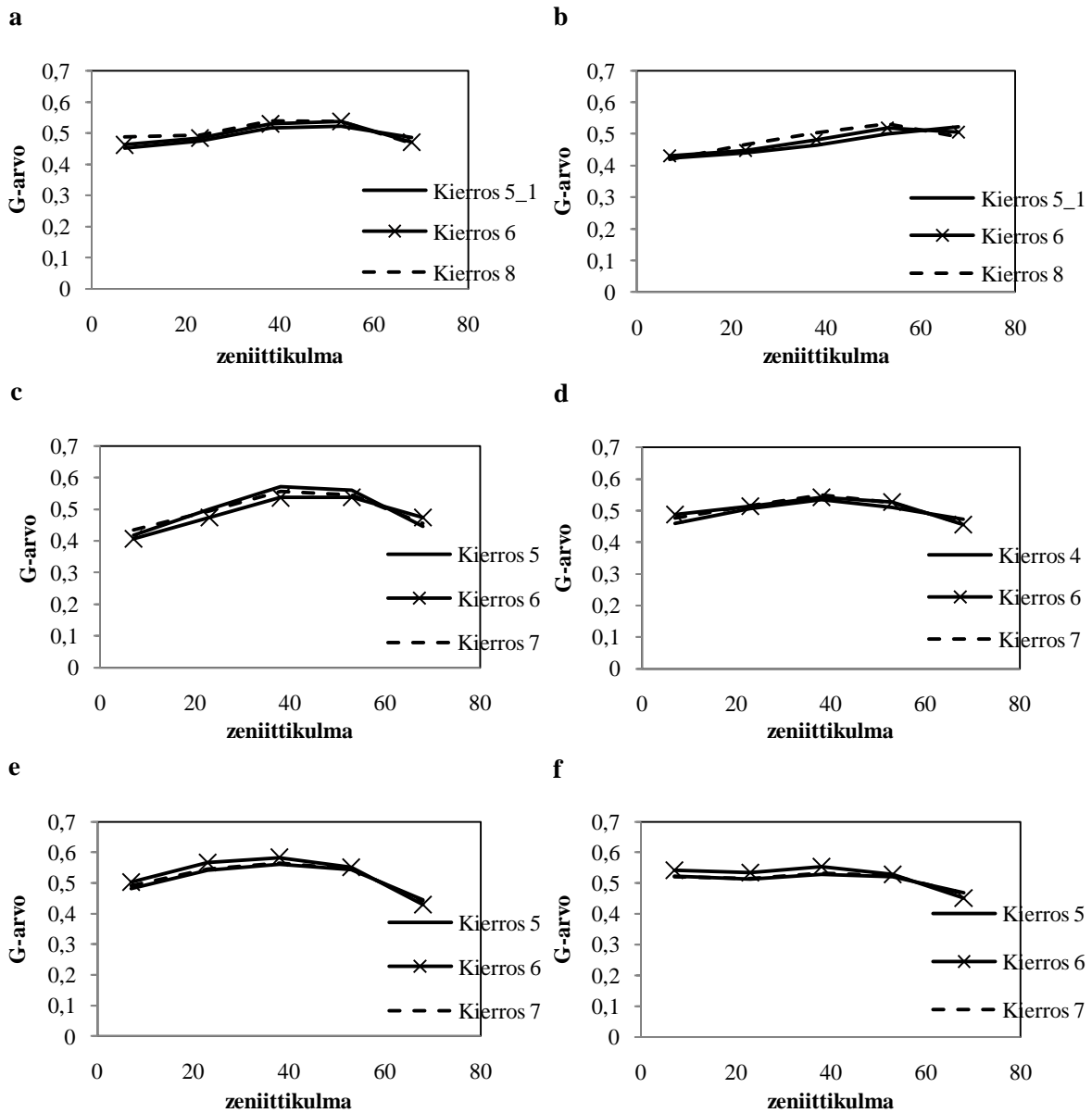


Kuva 8. Aukkoisuusfunktioiden ($T(\theta)$) tyypillinen muoto koealoittain. a. varttunut männikkö. b. nuori männikkö. c. varttunut kuusikko. d. nuori kuusikko. e. tiheä koivikko. f. harva koivikko.

3.5.2 Keskikesän G-funktioiden vertailu

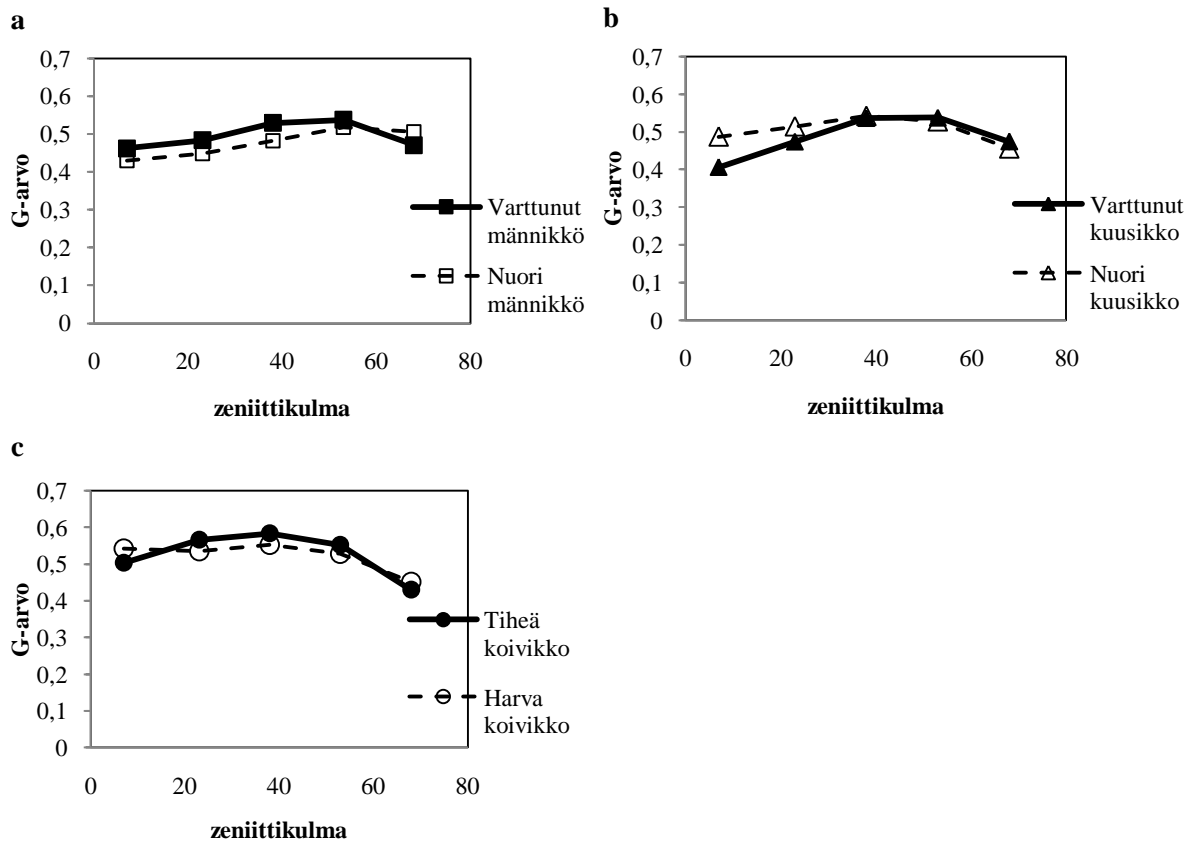
Keskikesän arvojen vertailuun valittiin viidennen (28.6 – 7.7., vuodenväli 178 - 187), kuudennen (26. -27.7., vuodenväli 206 - 207) ja seitsemännen mittauskerran (11.8 - 17.8., vuodenväli 222 - 228) G-funktiot. Tulosten luotettavuus lisääntyi, kun yhden mittausajankohdan sijasta käytettiin kolmea mittausajankohtaa. Nuoressa kuusikossa

jouduttiin kuitenkin käyttämään viidennen mittauskerran virheen sijasta neljännen mittauskerran (21.6., vuodenväli 171) arvoja. Männiköissä taas käytettiin seitsemännen mittauskerran sijasta kahdeksatta mittauskertaa (30.8., vuodenväli 242), sillä sääolosuhteiden vaihtuminen kesken mittauksen aiheutti virhettä tuloksiin. G-funktiot laskettiin aukkoisuusarvoista kaavan 10 avulla.



Kuva 9. Kolmen keskikesää lähinnän olleen kierroksen G-funktiot. a. varttunut männikkö. b. nuori männikkö. c. varttunut kuusikko. d. nuori kuusikko. e. tiheä koivikko. f. harva koivikko.

G-funktiot voidaan erottaa toisistaan muotonsa avulla. Kuvien 9 a - f avulla voitiin todeta keskikesän G-funktioiden olevan luotettavia, sillä kultakin koealalta oli mitattu ennen ja jälkeen keskikesän samanmuotoiset G-funktiot. Kuvien 10 a-c pohjalta voitiin havaita, että G-funktiot olivat hyvin samanlaisia puulajin sisällä. Puuston iällä ja rakenteella ei siis ole ratkaisevaa merkitystä G-funktion muotoon.



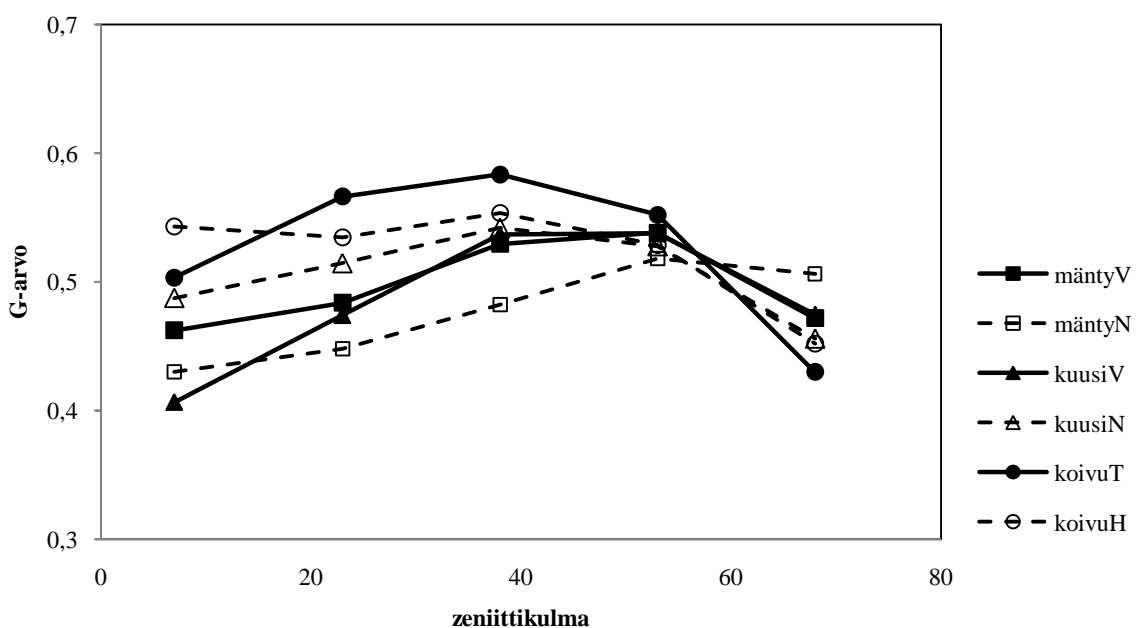
Kuva 10. Keskikesän G-funktiot. a. männiköt. b. kuusikot. c. koivikot.

Koealoittaiset G-funktiot oli mahdollista erottaa toisistaan funktioiden muotoja kuvaavien yksityiskohtien avulla (taulukko 6). Koealat voitiin jakaa kahteen ryhmään G-funktioiden funktioiden minimi- ja maksimiarvojen sijoittumisen perusteella. Taulukossa 6 esitetään myös suhteellinen vaihteluväli, jonka pohjalta voitiin havaita, että suppein vaihteluväli löytyi männiköistä (0,076 ja 0,088) ja nuoresta kuusikosta. Suurin suhteellinen vaihteluväli (0,154) oli tiheässä koivikossa ja toiseksi suurin varttuneessa kuusikossa.

Taulukko 6. G-funktioiden minimi- ja maksimikohtien sijainti sekä suhteellinen vaihteluväli intensiivialoilla.

	minimi kehällä	maksimi kehällä	suhteellinen vaihteluväli
Varttunut männikkö	1	4	0,076
Nuori männikkö	1	4	0,088
Varttunut kuusikko	1	4	0,131
Nuori kuusikko	5	3	0,086
Tiheä koivikko	5	3	0,154
Harva koivikko	5	3	0,101

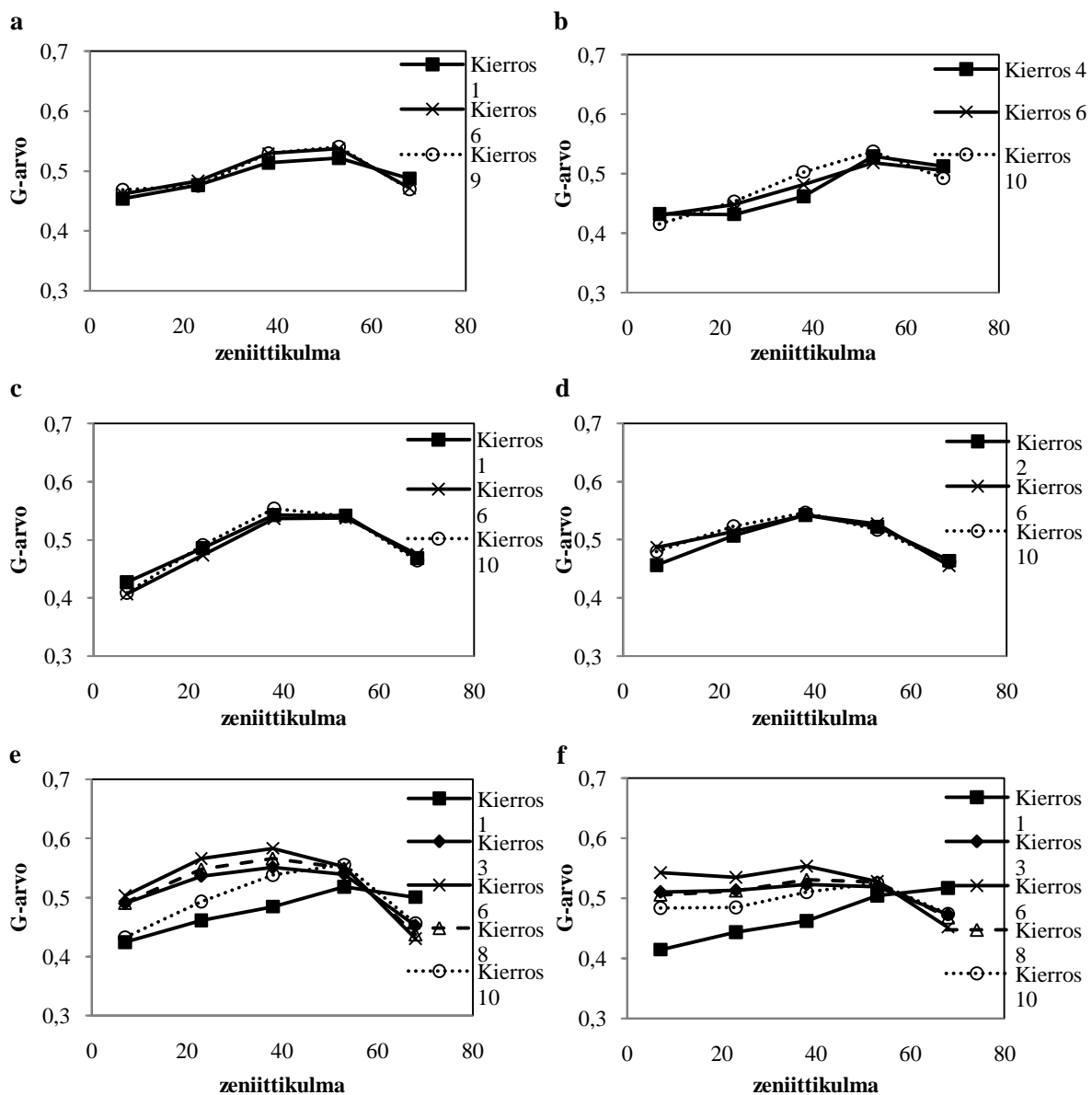
Keskikesän G-funktioiden (kuva 11) tarkastelun perusteella eri puulajien G-funktiot olivat erotettavissa toisistaan funktion muodon ja sitä kuvaavien parametrien avulla. Männiköillä arvot kasvoivat pienimmän zenittikulman pienimmästä arvostaan (0,45) neljännen kehän suurimpaan arvoonsa (yli 0,5). Tämän jälkeen funktio vähenee hieman. Kuusikoiden arvot kasvoivat 0,4 - 0,5 väliltä lähelle 0,55 ja laskivat 0,45:n. Suurimmat arvot kuusikot saivat kolmannella ja neljännellä kehällään. Varttuneessa kuusikossa ja molemmissa männiköissä G:n suurin arvo taas saavutettiin vasta neljännellä kehällä. Näiden koealojen G-funktioista voitiin todeta myös, että viidennen kehän G-arvot jäivät ensimmäisen kehän arvoja suuremmiksi. Koivikoilla oli selkeä trendi, joka alkoi G:n arvosta 0,5 – 0,54 (huippuarvot 0,55 – 0,58) ja laski selkeästi alemmaksi kuin kuusi- tai mäntyaloilla (viidennen kehän arvo 0,43 – 0,45).



Kuva 11. Kaikkien koealojen keskikesän G-funktiot.

3.5.3 G-funktioiden muutos kasvukauden aikana

Koivikoiden G-funktioiden muoto muuttui selkeästi kasvukauden aikana (kuvat 12e ja f). Ennen lehtien puhkeamista (ensimmäinen mittauskerta) koivikoiden G-funktiot muistuttivat männiköiden G-funktioita. Hyvin pian lehtien puhkeamisen jälkeen ne kehittivät ja saivat koivikoille tyypillisen kaarevan muodon. Viimeisellä mittauskerralla (kymmenes mittauskerta) tiheän koivikon G-funktion muoto alkoi muistuttaa nuoren kuusikon G-funktion muotoa, sillä osa lehdistä oli jo varissut. Harvassa koivikossa viimeisen mittauskierroksen G-funktio oli sitä vastoin vielä selkeästi tunnistettavissa koivikoksi.

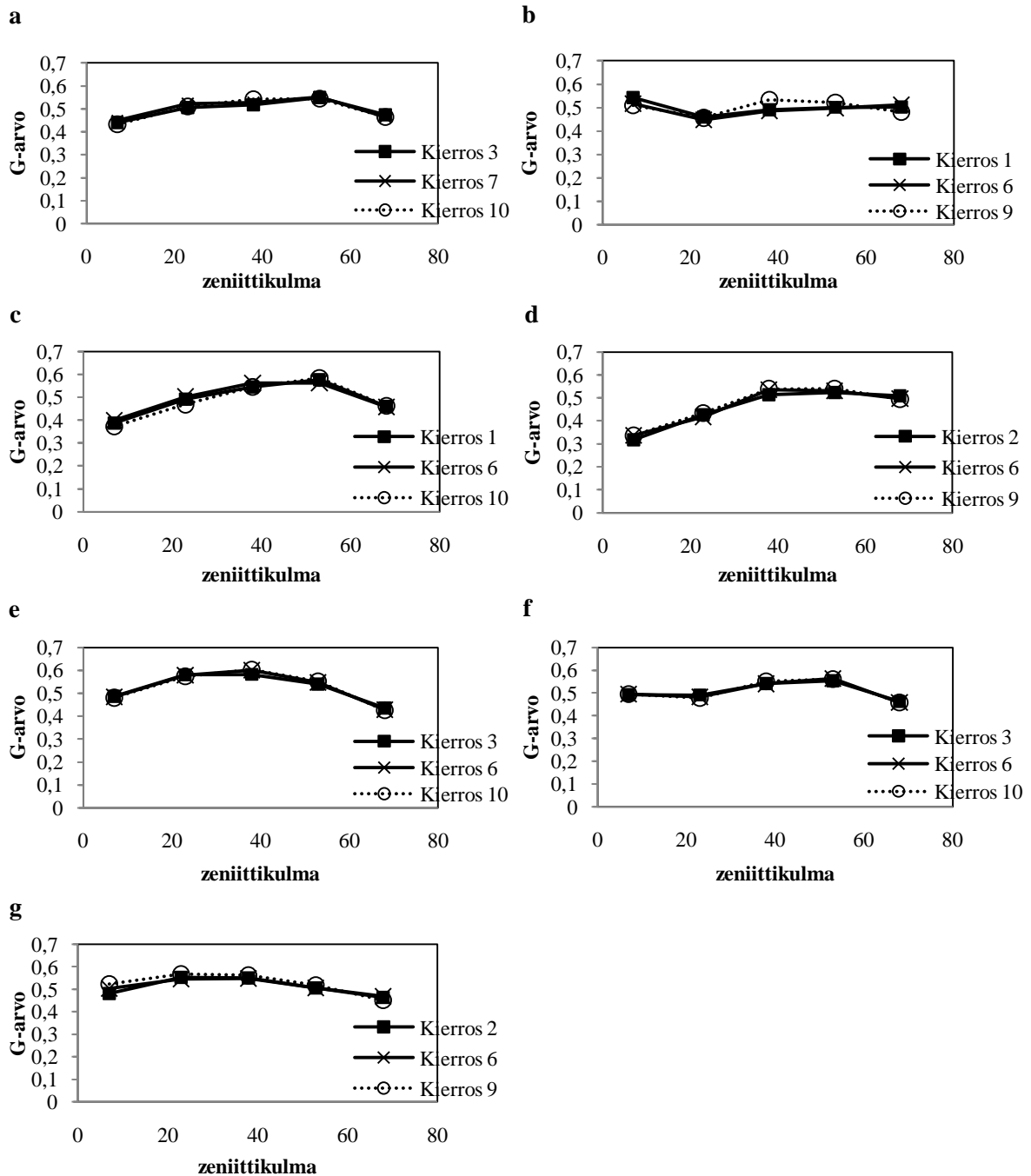


Kuva 12. G-funktioiden muodon muuttuminen kasvukauden aikana. a. varttunut männikkö. b. nuori männikkö. c. varttunut kuusikko. d. nuori kuusikko. e. tiheä koivikko. f. harva koivikko.

Havupuiden G-funktiot eivät juuri muuttuneet kasvukauden aikana (kuvat 12a-f). Varsinkin varttuneilla koealoilla muutos oli hyvin vähäistä (kuvat 12a ja c). Nuoressa kuusikossa ja männikössä (kuvat 12b ja d) voitiin kuitenkin havaita G-funktion muodon muuttumista. G-funktion muodon muutoksen voitiin ajatella johtuvan ainakin osittain uusien neulasten ja oksien kasvusta. Nuoressa männikössä (kuva 12b) ensimmäisen kierroksen asemesta käytettiin neljännen kierroksen arvoa, sillä aiempien kierrosten G-funktiot olivat sääolosuhteista johtuen vaihtelevia, eikä niitä voitu pitää todisteina kasvusta tai kehityksestä. Nuoressa kuusikossa käytettiin mittauskerran kaksi arvoa ensimmäisen mittauskerran asemesta, sillä myös tuolloin säällä oli vaikutusta mittausten luotettavuuteen.

3.5.4 VALERI -alojen G-funktioiden tarkastelu

Varttuneen VALERI -männikön (kuva 13a) G-funktio oli vastaavan intensiivikoealan kaltainen. Nuoren VALERI -männikön (kuva 13b) G-funktio sen sijaan sai pienillä zeniittikulmilla suuria arvoja, ja sen muoto oli kaksihuippuinen. Varttuneen VALERI -kuusikon (kuva 13c) G-funktio oli paljolti vastaavan intensiivialan G-funktion kaltainen, mutta neljännen kehän arvo oli poikkeavan suuri. Nuoren VALERI -kuusikon (kuva 13d) G-funktio sai pienillä zeniittikulmilla pienempiä arvoja kuin vastaava intensiiviala. Tiheän VALERI -koivikon (kuva 13e) G-funktio oli vastaavan intensiivialan kaltainen. Toisen VALERI -koivikon (kuva 13f) G-funktio muistutti paljolti harvan koivikon (intensiivialan) G-funktiota. Se oli kuitenkin tunnistettavissa koivikoksi, sillä viimeisen kehän arvo alitti ensimmäisen kehän arvon. Kolmannen VALERI -koivikon (kuva 13g) G-funktio poikkesi sekä tiheän että harvan intensiivikoivikon G-funktioista, mutta se oli kuitenkin tunnistettavissa koivikoksi funktion pyöreän muodon ja ensimmäisen (7 astetta) ja viimeisen (68 astetta) zeniittikulman suhteen perusteella.



Kuva 13. VALERI -alojen G-funktiot. a. varttunut männikkö (A4). b. nuori männikkö (U2). c. varttunut kuusikko (E7). d. nuori kuusikko (B2). e. tiheä koivikko (H5). f. harva koivikko (H3). g. melko tiheä koivikko (U16).

VALERI -aloista suurin suhteellinen vaihteluväli löytyi nuoresta kuusikosta (0,199) ja toiseksi suurin varttuneesta kuusikosta (0,164) (taulukko 7). Pienin vaihteluväli oli nuorella VALERI -männikössä (0,068), jossa funktion minimikohta oli toisella kehällä ja maksimikohta ensimmäisellä kehällä. Toiseksi pienin suhteellinen vaihteluväli oli melko tiheässä VALERI -koivikossa (0,08). G-funktioita tarkasteltaessa tulee kuitenkin muistaa, että mittauspisteitä oli yhdellä alalla vain 12 verrattuna intensiivialojen 81 mittauspisteeseen.

Lisäksi VALERI -alat olivat homogeenisiä puuston suhteen vain pienellä alueella mittauspisteiden ympärillä (kuva 4). Koealojen ulkopuolisella puustolla oli siis vaikutusta G-funktion muotoon VALERI -aloilla intensiivialoja enemmän.

Taulukko 7. G-funktioiden minimi- ja maksimikohtien sijainti sekä suhteellinen vaihteluväli VALERI -aloilla.

	minimi kehällä	maksimi kehällä	suhteellinen vaihteluväli
Varttunut männikkö (A4)	1	4	0,104
hNuori männikkö (U2)	2	1	0,068
Varttunut kuusikko (E7)	1	4	0,164
Nuori kuusikko (B2)	1	3	0,199
Tiheä koivikko (H5)	5	3	0,172
Harva koivikko (H3)	5	4	0,104
Melko tiheä koivikko (U16)	5	3	0,08

3.6 Teoreettisen ja mitatun G-funktion vertailu

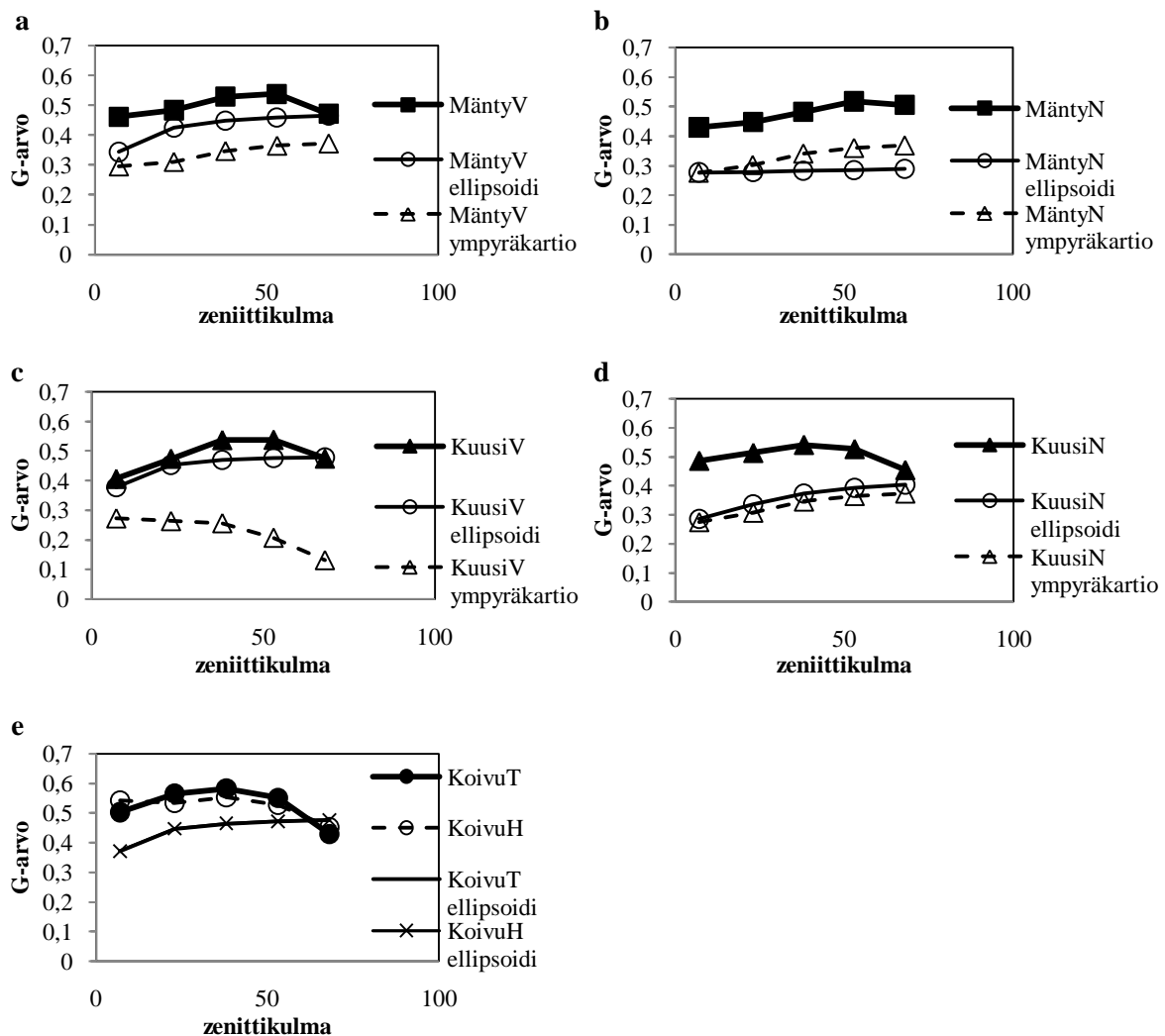
Simulointien tarkoituksena oli tutkia kuinka latvusmuoto ja latvuksen sisäinen ryhmittyminen vaikuttavat koealakohtaisten G-funktioiden muotoon. Simuloituja G-funktioita verrattiin empiirisiin G-funktioihin, sillä näin voitiin keskittyä muuttamaan yhtä parametria kerrallaan, ja havaita G-funktion muodossa tapahtuvat muutokset. Simuloinneissa käytettiin hyväksi tietoa koealojen puustotunnuksista, lehtialasta sekä runkoluvusta. Tutkittavat parametrit olivat latvusmuoto (latvusprojektiio), verson sammumiskerroin (G_v) sekä latvuksen pituuden ja leveyden välinen muotosuhde.

3.6.1 Latvusmuodon tarkastelu

Tarkasteluun valitut latvusprojektiot olivat ellipsoidi ja ympyräkartiio, sillä niitä on käytetty paljon latvustoa kuvaavissa malleissa. Havupuiden latvuksia approksimoitiin sekä ellipsoidin että ympyräkartiion avulla. Koivikoiden latvusmuotoa approksimoitiin vain ellipsoidina.

Männiköiden simuloitujen G-funktiot (kuvat 14a ja b) olivat pääosin nousevia. Simulointien avulla ei ollut mahdollista havaita mitattujen G-funktioiden vähenemistä neljännen kehän (zeniittikulma 53 astetta) jälkeen. Kuusikoiden simuloitujen G-funktiot (kuvat 14c ja d) olivat

männiköiden G-funktioita vaihtelevampia, sillä ne saattoivat olla sekä kasvavia että väheneviä. Kuusikoiden mitatut G-funktiot saavuttivat maksiminsa keskimmaisella (38 astetta) tai neljännellä (53 astetta) kehällään. Kuten männiköiden tapauksessa, ei tätäkään G-funktioiden ominaisuutta voitu havaita pelkän latvusprojektion avulla. Männiköissä ympyräkartio approksimoii G-funktion muotoa ellipsoidia paremmin. Varttuneen kuusikon tapauksessa (kuva 14c) kannatti latvuksen muodon mallinnukseen valita ellipsoidi, sillä ympyräkartion tuottaman G-funktion muoto oli hyvin poikkeava. Nuoressa kuusikossa (kuva 14d) molemmat latvusprojektiot olivat yhtä käyttökelpoiset.

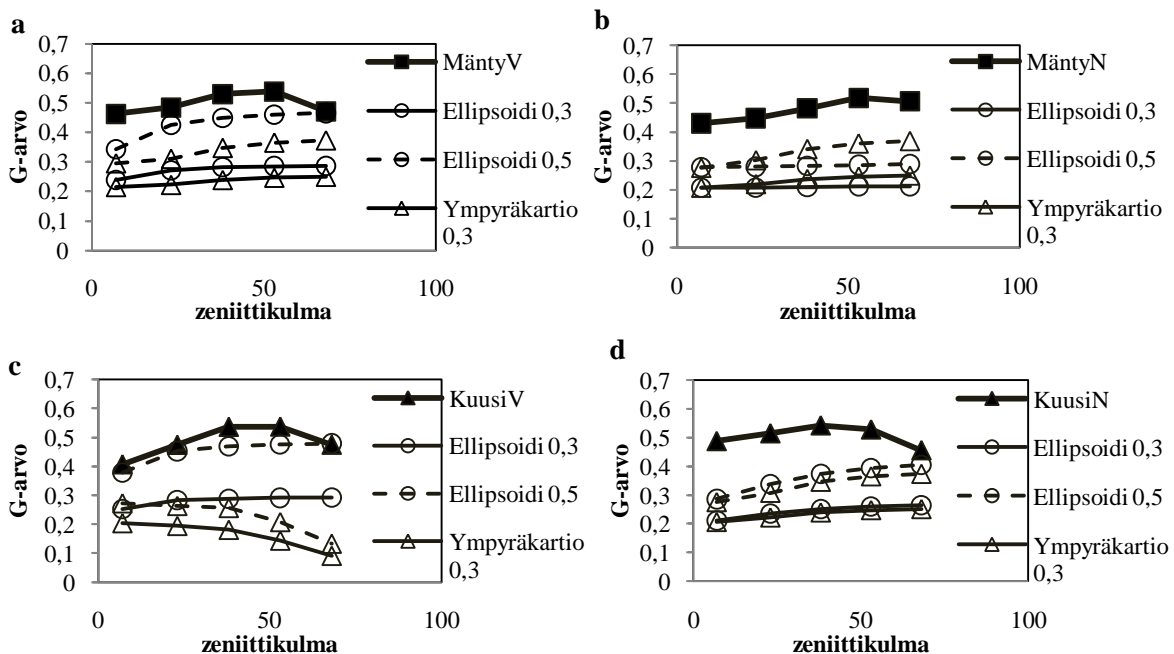


Kuva 14. Koealoittaisten mitattujen G-funktioiden vertailu simuloituihin G-funktioihin. a. varttunut männikkö. b. nuori männikkö. c. varttunut kuusikko. d. nuori kuusikko. e. tiheä ja harva koivikko. Mitattua G-funktiota kuvataan pelkällä koealan nimellä. Latvusprojektion ja koealan nimen yhdistelmä kertoo, millä projektiolla simulaatio tehtiin.

Koivikoiden (kuva 14e) mitatut G-funktiot olivat keskenään hyvin samanmuotoiset, kuten olivat myös koivikoiden simuloitua G-funktiot. Koivikoille simuloitua G-funktiot olivat päällekkäiset, sillä laskennassa käytetyt muuttujat kumoavat toistensa vaikutusta (esimerkiksi latvuspeiton vähentyessä latvussuhde kasvaa). Koivikoiden mitatut G-funktiot alkoivat vähetä kolmannen kehän (38 astetta) jälkeen. Simuloitua G-funktiot sen sijaan kasvoivat zeniittikulman kasvaessa.

3.6.2 Latvuksen sisäisen ryhmittäisyyden arviointi

Normaalitilannetta simuloitaessa oletettiin, että latvuksen sisäinen G on 0,5 ja että neulaset/lehdet olivat pallomaisesti orientoituneet. Mitattu (LAI-2000-laitteen mittauksista laskettu) G-funktio on jokaisella koelalalla keskimäärin 0,5, sillä sen arvo on laskennallisesti pakotettu kulkemaan tuon kohdan kautta. Latvuksen sisäistä ryhmittymistä testattiin muuttamalla simuloitua G-funktion G_l -arvo lähemmäs G_v -arvoa kertomalla se verson itsevarjostusta kuvaavalla parametrilla β . Vertailu perustui siis kaavaan $G_v = \beta G_l$, jossa β :n arvona on 0,6 ($\beta = 4 * STAR_{mean}$). Simuloitua G-funktioita verrattiin mitattuihin G-funktioihin visuaalisesti muotonsa puolesta. Testaus tehtiin vain havupuualoille.



Kuva 15. Teoreettisten G-funktioiden tarkastelu. a. varttunut männikkö. b. nuori männikkö. c. varttunut kuusikko. d. nuori kuusikko. Mitattua G-funktiota kuvataan pelkällä koelalan nimellä. Muotokuoren ja G_v -parametrin yhdistelmä kertoo, millä muotokuoren ja parametrin yhdistelmällä simulaatio tehtiin.

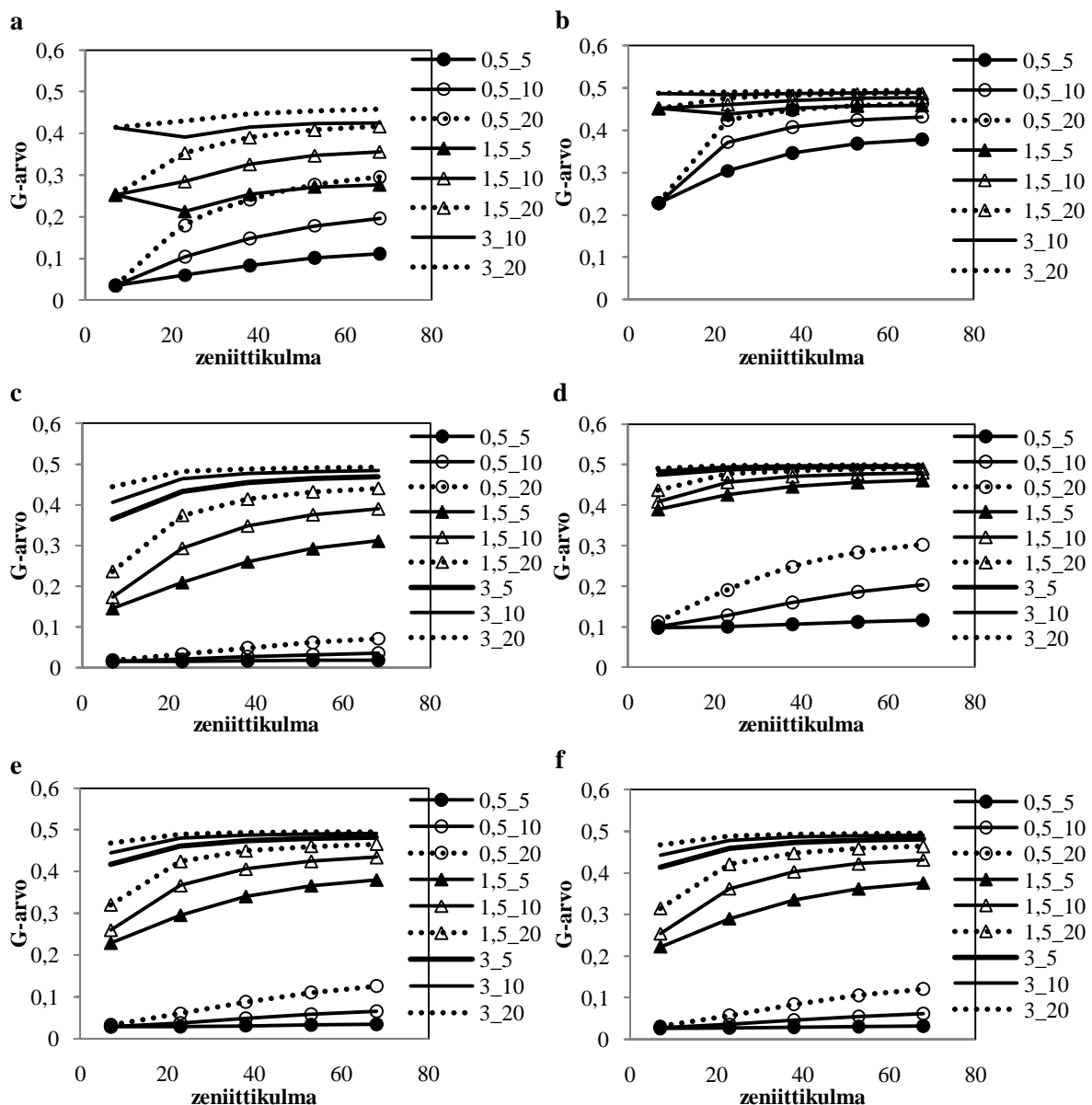
Männiköiden (kuvat 15a ja b) latvukset voitiin approksimoida ympyräkartiomallilla latvuksen G_v :n ollessa keskimäärin 0,5 (eli kun $\beta = 1$ sisäistä ryhmittymistä ei ole). Kuusikoiden (kuvat 15c ja d) latvukset olivat approksimoitavissa parhaiten ellipsoidimallilla. Tosin nuorissa kuusikoissa (kuva 15d) molemmat latvusprojektiot tuottivat samankaltaisen approksimaation. Varttuneen kuusikon G_v :n voitiin olettaa olevan 0,5 ja nuoren kuusikon G_v :n 0,3. Männiköissä ja varttuneessa kuusikossa toiseksi parhaiten mitatun G-funktion muotoa simuloi ellipsoidimalli G_v :n arvolla 0,3.

3.6.3 Latvuksen muotosuhteen vaikutus G-funktion muotoon

Latvuksen muotosuhteella tarkoitetaan elävän latvuksen pituuden ja leveyden välistä suhdetta. Muotosuhteen vaikutusta G-funktion muotoon tarkasteltiin muuttamalla simulaatioiden parametreja vain latvuksen säteen ja pituuden osalta. Koealoittainen tarkastelu suoritettiin käyttäen kolmea latvuksen sädettä: 0,5, 1,5 ja 3 metriä ja kolmea latvuksen pituutta: 5, 10 ja 20 metriä. Männiköiden latvusprojektionä käytettiin ympyräkartiota ja kuusikoiden ja koivikoiden latvusprojektionä ellipsoidia. Latvuksen sisäinen lehtialaindeksi pysyi vakiona, vaikka latvuksen tilavuutta muutettiin. On hyvä muistaa, että ympyräkartiion tilavuus on puolet ellipsoidin tilavuudesta, kun latvuksen pituus ja säde ovat samat.

Latvuksen leveys (r) vaikuttaa merkittävästi G-funktion alkutasoon. Esimerkiksi varttuneessa männikössä (kuva 16a) latvuksen säteellä 0,5 (metriä) latvuksen pituuden lisääminen kasvatti G-funktion kulmakerrointa. Kun latvuksen säde oletettiin 1,5 metrin levyiseksi, latvuksen pituuden lisääntymisestä johtuva kulmakertoimen kasvu tasoittui, mutta jatkui nousujohteisena. Käyrä, joka on merkitty selitteessä 1,5_5 (leveys 1,5 metriä ja pituus 5 metriä) oli kuitenkin varsin poikkeava, sillä sen arvo väheni ensin ja muuttui kasvavaksi 23 asteen jälkeen. Latvuksen säteen ollessa kolme metriä ja pituuden viisi metriä, ei ympyräkartiomalli toiminut. Latvuksen säteen ollessa kolme metriä tarkasteltiin siis puita, joiden pituus on 10 ja 20 metriä. Funktion, jonka pituusoletuksena on 10 metriä (ja säde 3 metriä), kulmakerroin väheni jälleen alussa 23 asteen kulmaan asti ja muuttui sen jälkeen kasvavaksi. Latvuksen säteen ollessa kolme metriä ja pituuden 20 metriä, oli varttuneen männikön G-funktio hyvin tasaisesti nouseva (ellipsoidimainen). Nuoressa männikössä (kuva 16b) funktiot alkoivat ylempää kuin varttuneessa männikössä. Käyrä 1,5_5, käyttäytyi myös nuoressa männikössä poikkeavasti. Latvuksen säteen ollessa kolme metriä olivat

funktiot liki suoria. Vertaamalla männiköiden ja kuusikoiden funktioita oli helppo havaita käytetyn latvusprojektion vaikutus G-funktion muotoon. Varttuneessa kuusikossa (kuva 16c) latvuksen säteen ja pituuden vaikutus funktion muotoon oli joustavampi kuin männiköissä. Tässä suhteessa ellipsoidimalli on ympyräkartiomallia toimivampi, sillä funktion alkutaso saa vaihdella. Nuoressa kuusikossa (kuva 16d) vaihtelu oli hyvin samankaltaista nuoren männikön kanssa. Koivikoiden (16e ja f) funktiot olivat melko identtiset samankaltaisista lähtötiedoista johtuen. Latvuksien leveyden kasvaessa, ei latvuksen pituuden kasvattaminen enää muuta G-funktion muotoa.



Kuva 16. Latvuksen pituuden ja leveyden välisen suhteen vaikutus G-funktion muotoon. a. varttunut männikkö (ympyräkartio). b. nuori männikkö (ympyräkartio). c. varttunut kuusikko (ellipsoidi). d. nuori kuusikko (ellipsoidi). e. tiheä koivikko (ellipsoidi). f. harva koivikko (ellipsoidi). Selitteen ensimmäinen osa kertoo käytetyn latvuksen säteen ja toinen osa latvuksen pituuden.

4. Tulosten tarkastelu

Kuten Horn (1971) jo aikoinaan päätteli, samaan puulajiin kuuluvilla puilla on omanlaisensa latvusmuoto ja -rakenne. Latvuksien ominaisuudet: latvuksen muoto, oksikkuus, oksakulma, versojen koko ja rakenne sekä lehtien/neulasten orientaatio- ja tilajakauma vaikuttavat säteilyn kulkuun (ja interseptioon) kasvustossa. Puulajikohtaisten G-funktioiden muodoista tai (metsikön rakenteen vaikutuksesta G-funktion muotoon) ei kuitenkaan ollut selvyttä, sillä vastaavaa tutkimusta ei ollut tehty aiemmin. Puulajien välillä oli kuitenkin syytä olettaa olevan eroavaisuuksia latvuksien puulajikohtaisten ominaisuuksien vuoksi.

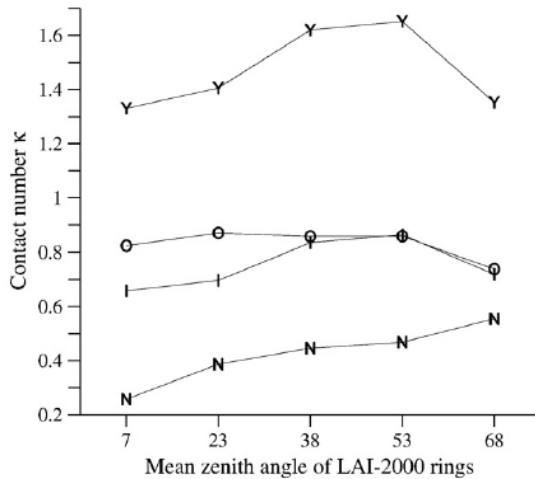
G-funktiot voidaan tunnistaa puulajin perusteella käyttäen hyväksi tietoa suhteellisista minimi- ja maksimiarvoista sekä vaihteluvälistä, jolla funktio liikkuu. Suhteellinen vaihteluväli on pienin männiköissä ja nuoressa kuusikossa. Suurin vaihteluväli on tiheässä koivikossa ja toiseksi suurin varttuneessa kuusikossa. Myös ensimmäisen ja viimeisen zeniittikulman suhdetta tarkastelemalla päästään arvioimaan puulajia. Mäntyjen G-funktio kasvaa hieman pienimmältä (7 astetta) zeniittikulmalta suurimmalle (68 astetta) zeniittikulmalle. Kuusilla G-funktio kasvaa voimakkaammin pienimmältä zeniittikulmalta suurimmalle zeniittikulmalle. Koivikoiden G-funktion arvo on 68 asteen zeniittikulmassa pienempi kuin 7 asteen zeniittikulmassa. G-funktion pienimmän zeniittikulman avulla on mahdollista arvioida koealan latvuspeittoa ja muiden zeniittikulmien kautta latvuston aukkoisuutta ja puuston tiheyttä. G-funktion arvon väheneminen suurimmalla (tai kahdella suurimmalla) kehällä voisi viitata lehtien/neulasten asennoitumiseen enemmän vertikaalisesti. Toisaalta myös kapea latvusmuoto voi aiheuttaa ilmiön.

Otoskoon tarkastelun pohjalta todettiin, että intensiivikoealan LAI -estimaatti vakiintuu jo noin 20 mittauspisteen kohdalla. Intensiivikoealojen mittauspisteiden lukumäärä (81) on siis jopa liioitellun suuri, sillä luotettavia tuloksia saataisiin paljon pienemmällä mittauspisteiden määrällä. Tulosten testauksen yhteydessä havaittiin myös, että VALERI -alojen 12 mittauspistettä riittää tuottamaan puulajityypillisen G-funktion. Tämän havainnon pohjalta voidaan siis todeta, että puulajikohtaiset G-funktiot voidaan määrittää myös varsin pienestä määrästä mittauspisteitä. Mittauspisteiden lukumäärää tärkeämpänä voidaankin pitää koealan asemointiin liittyviä seikkoja, kuten maanpinnan kaltevuutta. Molempien intensiivikuusikoiden mittauspisteet sijaitsivat rinteessä. VALERI -kuusikot sen sijaan

sijaisivat molemmat tasamaalla. Nuoressa intensiivikuusikossa havaittu pieni suhteellinen vaihteluväli voisi selittyä rinteen vaikutuksella, sillä myös varttuneen intensiivikuusikon vaihteluväli jäi pienemmäksi kuin vastaavilla VALERI -aloilla. Rinteen kaltevuudesta johtuen, on perusteltua olettaa, että VALERI -kuusikoiden G-funktiot edustavat kuusikoiden G-funktiota intensiivialoja paremmin. Tukea teoriaan antaa melko tiheä VALERI -koivikko (U16), sillä se sijaitsee kumpareen päällä, ja sen G-funktion vaihteluväli jäi hyvin pieneksi. Rinne siis pienentää G-funktion vaihteluväliä, jonka vuoksi eri puulajien G-funktioiden erottaminen vaikeutuu. Puulajityypilliset G-funktiot voidaan siis määrittää luotettavasti vain tasamaalla sijaitseville koealoille.

Havupuiden neulasista vaihtuu vuosittain vain pieni osa (Stenberg ym. 1994a, Hakkila 1991), joten oli oletettavissa, ettei havupuiden G-funktio juuri muutu kasvukauden aikana. Männyillä neulaskertoja on kuusta vähemmän, joten niiden G-funktioissa olisi havaittavissa kasvukauden aikaisia muutoksia kuusialoja todennäköisemmin. Männiköiden suhteellisen pieni lehtiala ja sääolosuhteissa tapahtuvat muutokset mittausten aikana kuitenkin aiheuttavat sen, ettei näin pieniä muutoksia voida lähteä tulkitsemaan luotettavasti. LAI:n tulisi kuitenkin kasvaa myös havupuualoilla kasvukauden aikana. Mikäli LAI-2000-laite mittaisi todellisen lehtialaindeksin, olisi lehtialan kasvu havaittavissa. Efektiivinen lehtiala -estimaatti on kuitenkin niin karkea mitta, ettei näin pieniä muutoksia saada estimoitua luotettavasti. Lehtipuualoilla kasvukauden aikaiset muutokset G-funktion muodossa olivat helposti havaittavissa. G-funktion muodon muutoksien syyt ovat myös helposti havaittavissa, sillä lehtien puhkeaminen keväällä, niiden kasvu täyteen kokoonsa ja syksyllä tapahtuva variseminen muuttavat metsikön säteilyoloja huomattavasti.

Solbergin ym. (2009) tekemissä tutkimuksissa tarkasteltiin kuusikoiden rakenteen vaikutusta säteilyn suunnittaiseen sammumiseen ($GL/\cos\theta$ vertaa kaavaan 3). Verrattaessa intensiivialoilta mitattuja G-funktioita Solbergin ym. (2009) aineistoon (kuva 17) havaitaan, että varttuneiden kuusikoiden funktiot ovat lähes identtisen muotoiset. Toisaalta nuoren intensiivikuusikon G-funktion voidaan havaita vastaavan vanhan kasvatusmetsän funktiota. Solbergin ym. (2009) tutkimus kuitenkin vahvistaa ajatusta, että G-funktion muodon perusteella olisi mahdollista arvioida sekä puulajia että metsikön rakennetta.



Kuva 17. Kuusikon rakenteen vaikutus säteilyn sammumiseen. N. istutettu. Y. nuori kasvatusmetsä. I. varttunut kasvatusmetsä. O. vanha kasvatusmetsä. (Solberg ym. 2009)

Mäntyjen latvusmuoto on approksimoitavissa parhaiten ympyräkartion avulla. Kuusien ja koivujen latvusmuodon approksimointiin parhaana vaihtoehtona voidaan pitää ellipsoidia. Nuoressa kuusikossa molemmat muotokuoret toimivat yhtä hyvin. Tulos on yhtenevä Ervastin (2006) tekemien tutkimusten kanssa, joissa ilmeni männyn latvusten olevan kuusen latvuksia kartiomaisempia. Samassa tutkimuksessa Ervasti (2006) kuitenkin ehdottaa, että latvuksien tilavuutta mallinnettaisiin ellipsoideina puulajista riippumatta. Simulaatioiden pohjalta näyttäisi kuitenkin perustellulta käyttää kuuselle ja männylle eri latvusprojektiota. Teoreettisten G-funktioiden perusteella ei männiköiden tai varttuneen kuusikon latvuksissa ole havaittavissa ryhmittyneisyyttä (kun G_v on keskimäärin 0,5). Tämä tulos oli odotettavissa, sillä Millerin (1967) mukaan G:n arvo muuttuu katselukulman tai lehtien asennon vaihtuessa, mutta sen keskiarvo kaikkien katselukulmien yli on lehtien asennosta riippumaton. Nuoren kuusikon tapauksessa G_v :n keskiarvo on kuitenkin simulaatioiden perusteella lähempänä arvoa 0,3. Tämän voidaan arvioida johtuvan nuoren kuusen suuremmasta ryhmittymisasteesta, jolloin enemmän valoa pääsee kulkemaan latvuksen läpi.

Latvuksien muotosuhteiden perusteella voidaan todeta käytetyllä projektiolla olevan suuri vaikutus G-funktioiden yleiseen muotoon. Ellipsoidien kohdalla pätee, että latvuksen leveys ei ole kompensoitavissa latvuksen pituutta kasvattamalla. Toisaalta, jos latvus on todella leveä, ei latvuksen pituudella ole oikeastaan merkitystä. Ympyräkartion kohdalla latvuksen leveyden ja pituuden välinen suhde on joustavampi kuin ellipsoidilla.

Teoreettisten laskelmien käyttö ei ole kuitenkaan aivan ongelmatonta, sillä simulaatioiden tuottamat G-funktiot kuvaavat lähtökohtaisesti eri asioita kuin mitatut G-funktiot. Teoreettiset G-funktiot kuvaavat koealoittaisen mediaanipuun G-funktiota. LAI-2000-laitteella mitattu G-funktio sitä vastoin sisältää koko metsän G-funktion. Teoreettiset G-funktiot perustuvat oletukseen metsästä, jonka tilajärjestys on Poisson -jakauman mukainen (lehtiala ryhmittynyt latvuksiin). Mitatut G-funktiot sitä vastoin perustuvat oletukseen, että lehdet (neulaset) ovat jakautuneet latvustoon satunnaisesti (samean väliaineen tavoin). Teoreettisissa laskelmissa ei siis ole huomioitu versojen vaikutusta säteilyn sammumiseen. Näiden lähtökohtaisten erojen vuoksi G-funktiot ovat verrattavissa toisiinsa vain muotonsa puolesta.

Verrattaessa koealoilta mitattuja G-funktioita lehden/neulasen G-funktioon (kuvat 2a ja b) voidaan havaita, että funktioiden muodoissa on lähtökohtaisesti eroja. Litteän lehden G-funktio vaihtelee ääriasennoissaan (engl. erectophile/planophile orientation) välillä 0 - 1. Neulasen G-funktion vaihtelee ääriasennoissaan 0,1 ja 0,6 välillä. Voidaan havaita, että keskimääräisillä lehtikulmilla G-funktio voi olla esimerkiksi kaksihuippuinen. Myös neulasen G-funktion kohdalla lievä kaksihuippisuus on mahdollista keskimääräisillä neulaskulmilla. Nuoren VALERI -männikön (kuva 13b) G-funktio on kaksihuippuinen, joten myös metsikköä kuvaavat G-funktiot voivat olla kaksihuippuisia. Syy metsiköstä mitatun G-funktion kaksihuippuisuuteen on kuitenkin todennäköisesti latvuston aukkoisuudessa, eikä neulasten orientaatiossa. Latvuksen muotosuhteen tarkastelun yhteydessä havaittiin, että ympyräkartio tuottaa samankaltaisen notkahduksen toisella kehällään, kun latvuksen säteeksi valitaan 1,5 metriä ja latvuksen pituudeksi 5 metriä. Verrattaessa koivikoiden (metsikön) keskimääräistä G-arvoa 0,5 teoreettiseen lehden G-funktioon havaitaan lehtikulman olevan silloin noin 60. Havainto saa vahvistusta LAI-2000-laitteella tehtyjen mittausten tulosteiden MTA -arvoista (engl. mean tilt angle), jotka ovat tavallisesti lähellä edellä mainittua lehtikulmaa. Mikäli MTA -arvot olisivat lähellä nollaa tai yhdeksääkymmentä astetta latvustoelementit olisivat orientoituneet joko täysin horisontaalisesti tai vertikaalisesti, mikä ei ole Suomen oloissa tyypillistä, sillä puut ovat sopeutuneet vallitseviin valo-olosuhteisiin.

Tuloksista voidaan päätellä, että sillä käytetäänkö tulosten laskentaan neljää kehää vai vain neljättä kehää, ei ole suurta merkitystä tuotettuun LAI -estimaattiin. Laskettaessa LAI -estimaatti neljän kehän pohjalta sen arvo kasvaa 5,7 prosenttia verrattuna kaikkien kehien tuottamaan LAI -estimaattiin. Jos tarkastelu suoritetaan vain neljännen kehän pohjalta kasvaa LAI -estimaatti keskimäärin 6,5 prosenttia. Leblanc & Chen (2001) ovat osoittaneet

viidennen kehän yliarvioivan latvuston aukkoisuutta lehvästössä tapahtuvan säteilyn sironnan vuoksi, ja että vain neljännen kehän käytöllä voidaan saada riittävän tarkka arvio lehtialaindeksistä. Tämän tutkimuksen laskentojen perusteella voidaan yhtyä siihen, että LAI -estimaatti kasvaa kun viidennen kehän sulkee pois tarkastelusta. Suurinta LAI -estimaatin muutos oli tiheässä koivikossa, jossa viidennen kehän jättäminen pois tarkastelusta kasvatti estimaattia melkein 11 prosenttia (vain neljännen kehän pohjalta tehty laskenta tuotti likimain saman tuloksen). Harvassa koivikossa LAI -estimaatti kasvoi 5 - 6 prosenttia, varttuneessa kuusikossa 5 - 7 prosenttia, varttuneessa männikössä 5-7 prosenttia ja nuoressa kuusikossa 6 prosenttia. Säteilyn sironnan vaikutus viidennen kehän arvoon ei siis riipu pelkästään lehtialaindeksistä. Ainoastaan nuoressa männikössä LAI -estimaatti pysyi liki samana (LAI:n kasvu 0,2-3 prosenttia), kun viides kehä jätettiin pois laskennasta. Solbergin ym. (2009) mukaan viidettä kehää hallitsevat oksat ja rungot varsinaisen lehtialan asemesta (varsinkin vanhoilla ja suuren LAI:n omaavilla aloilla). Näiden havaintojen pohjalta voisi nuoren männikön lehtialaindeksin ajatella olevan kompromissi, jossa runkojen jääminen pois tarkastelusta vähentää lehtialaindeksiä, mutta säteilyn sironna kasvattaa sitä. Stenbergin ym. (1994b) männiköissä tehdyissä tutkimuksissa havaittiin, että LAI -estimaatti muuttui vähemmän kuin 5 prosenttia puolella aloista ja puolella aloista se lisääntyi 9 – 13 prosenttia, kun viides kehä suljettiin pois tarkastelusta. Tämän tutkimuksen männiköiden LAI – estimaatti muuttui siis hyvin kohtuullisesti (0,2 – 7 prosenttia) verrattuna Stenbergin ym. (1994b) tuloksiin. Stenbergin ym. (1994b) tutkimus on kuitenkin yhtenevä Solbergin (2009) tutkimustuloksien kanssa, sillä suurimmat muutokset havaittiin tiheimmillä koaloilla. Kehien jättäminen pois tarkastelusta kuitenkin aiheuttaa, ettei kaava 4 (integrointi koko ylemmän puoliavaruuden yli) ei enää päde, ellei neulasten/lehtien orientaatio ole pallomainen (kuva 1b) (Stenberg ym. 1994b).

Tulevaisuudessa metsiköiden G-funktioita tulisi tarkastella myös sekametsien osalta, sillä tämä tutkimus keskittyi määrittämään vain puhtaiden koalojen tyypillisiä G-funktioita. Ratkaisematta on myös, kuinka metsikön muut ominaisuudet (rinteen kaltevuus, koalan koko) tai maantieteellinen alue vaikuttavat G-funktion muotoon. Koska G-funktio on suhteellisen helposti määritettävissä oleva fysikaalinen muuttuja, sen pohjalta on mahdollista kehittää niin kasvumallien, tuotosekologian kuin kaukokartoituksenkin ennusteita ja menetelmiä.

4.1 Tulosten luotettavuuden arvioiminen

Tuloksiin aiheutuu virhettä mm. mittalaitteen, mittaajan, kalibroinnin, vaateroinnin, sään ja muiden mittausten aikaisten tekijöiden vaikutuksesta. Tekijät jakautuvat systemaattisiin ja satunnaisiin virheisiin. Satunnaisten virheiden voidaan ajatella kumoavan toisiaan. Sen sijaan systemaattisten virheiden havaitseminen on vaikeampaa. Satunnaisena virheenä voidaan pitää LAI-2000-laitteen sensorin liikettä mittauksen tekohetkellä. Systemaattista virhettä edustaa esimerkiksi kalibroinnin onnistuminen eri mittauskierrosten välillä.

Suurin yksittäinen tuloksiin virhettä aiheuttava tekijä on säätilan muuttuminen kesken mittausten. Tällä on merkitystä varsinkin referenssistä kaukaisimmilla (noin 1 kilometri) koealoilla. Virhe korostuu, mikäli koealalla on pieni lehtialaindeksi, sillä suhteellisesti enemmän valoa pääsee latvuston läpi. Koealan pieni lehtialaindeksi tarkoittaa myös, että suhteellisen suuri osa (optisesti mitatusta) lehtialaindeksin -estimaatista muodostuu rungoista ja oksista. Tällöin esimerkiksi mittauspisteiden paikan muuttuminen muutamilla senteillä saattaa aiheuttaa suuria eroja yksittäisistä mittauspisteistä saatuihin arvoihin. Tätä mittauspisteiden paikan vaihtelua ei kuitenkaan pidetä vakavana virheenä mittauspisteiden suuren lukumäärän vuoksi, ja sen voidaan ajatella kuuluvan satunnaisiin virheisiin, jotka kumoavat toisiaan. Nämä syyt yhdessä ovat saattaneet aiheuttaa esimerkiksi männiköiden mittaustuloksiin hajontaa, jonka suuruus on samansuuntainen saman mittauskierroksen sisällä, ja saattaa poiketa paljonkin edellisen tai seuraavan mittauskierroksen tuloksista.

Molempien intensiivikuusikoiden G-funktioissa on virhettä maaston kaltevuudesta (rinteestä) johtuen. Rinteen aiheuttamaa virhettä voidaan kuitenkin pitää ”vääristymänä”, sillä edellä mainittujen kuusikoiden G-funktiot olivat kuitenkin tunnistettavissa kuusikoiksi. Tukea teorialle antaa mäen päällä sijaitseva VALERI -koivikko, jolta mitattiin epätyypillinen, mutta koivikoksi tunnistettava G-funktio. Maaston kaltevuus aiheuttaa tuloksiin lähinnä systemaattista virhettä. Virheen lähde (rinne) on kuitenkin helposti havaittavissa mittauksia tehtäessä, jolloin koealan paikka voidaan vaihtaa virheen poistamiseksi.

4.2 Tulosten soveltuvuus

Puulajien erottaminen sekä optisen kaukokartoituksen aineistoista että laserkeilauksen avulla on yhä ajankohtainen ongelma. ALS (engl. airborne laser scanning) aineistoja analysoitaessa tieto metsikön rakenteesta ja aukkojen sijainnista voi auttaa erottamaan puulajit toisistaan. Yksittäisten latvuksien rakennetta on vaikea tulkita kaukokartoitusaineistoista, sillä puut kasvavat lähellä toisiaan ja alikasvoksesta pääsee heijastumaan paljon säteilyä (Rautiainen ym. 2008a.). Ratkaisu ongelmaan voisi olla pyrkiä erottamaan eri puulajien metsiköt metsikkökohtaisten ominaisuuksiensa (kuten G-funktioiden) avulla, sen sijaan, että keskityttäisiin yksittäisiin latvuksiin tai piirteisiin. Koska puulaji yhdessä metsikön rakenteen kanssa vaikuttaa metsästä heijastuvaan säteilyyn, voidaan puulajikohtaisten G-funktioiden avulla epäsuorasti arvioida sekä metsästä tapahtuvaa heijastusta että metsikön sisäisiä säteilyolosuhteita. Puulajikohtainen G-funktio on parametri, jonka avulla voidaan kalibroida malleja, joissa tarvitaan tietoa säteilyn kulusta erilaisissa kasvustoissa. Optisen kaukokartoituksen aineistoja tulkitaan heijastusmallien avulla, joissa metsikön säteilyolosuhteet invertoidaan satelliittikuvalta havaittavaksi heijastustiedoksi.

Landsat ja SPOT -kuvat otetaan yleensä aamupäivällä, auringon zenittikulman ollessa noin 40 astetta. Tämä kulma vastaa melko hyvin LAI-2000-laitteen keskimäistä kehää (38 astetta). Heijastussuhteella tarkoitetaan kohdepinnan heijastaman säteilyvuon suhdetta ideaaliseen pintaan valaistus- ja mittausgeometrian pysyessä muuttumattomina (Rautiainen ym. 2006). Koska heijastussuhde vaihtelee auringon ja satelliitin mittausanturin kulman mukaan, voitaisiin tuota kolmannen kehän G-funktion arvoa käyttää hyväksi heijastussuhteen estimoinnissa. Kolmannen kehän (38°) mitattu G-arvo vaihtelee 0,5 molemmin puolin metsikön rakenteesta riippuen (katso taulukko 8). Vain nuorena männikössä G:n arvo jää kolmannella kehällä alle 0,5:n. Suurimmat G-arvot löytyvät koivikoista (0,58 ja 0,55). Säteily sammuu siis satelliittien yleisimmässä kuvaussuunnassa tehokkaammin, kuin mitä kaikkien suuntien yli laskettu keskiarvo (0,5) antaa olettaa. Verrattaessa keskikesän (26. – 27.7.) koealoittaisia kolmannen kehän G-arvoja koko kesältä laskettuihin kolmannen kehän keskiarvoihin voidaan havaita, etteivät keskikesän arvot poikkea juurikaan kasvukauden keskiarvostaan. Säteilyn sammuminen on siis kolmannella kehällä yleisesti 0,5:tä suurempaa sekä havu- että lehtipuilla.

Taulukko 8. Kolmannen kehän (38°) G-arvo keskikesällä ja keskiarvona koko kasvukaudelta.

	keskikesän G-arvo	kasvukauden keskiarvo
Varttunut männikkö	0,53	0,52
Nuori männikkö	0,48	0,50
Varttunut kuusikko	0,54	0,55
Nuori kuusikko	0,54	0,55
Tiheä koivikko	0,58	0,55
Harva koivikko	0,55	0,52

Puulajien erottaminen monikulmaisen aineiston avulla on teoreettisesti mahdollista puulajikohtaisen geometrisen rakenteen ja tilajärjestyksen kautta. Rautiaisen ym. (2008c) tekemässä tutkimuksessa verrattiin havu- ja lehtipuualoja toisiinsa monikulmaisten CHRIS PROBA kuvien avulla. Kuvat oli otettu zeniiittikulmissa 7.6°, 37.2° ja 56.7°. Tutkimuksessa todettiin, että mitä vinompi katselukulma on, sitä suurempi osa heijastuksesta tulee latvuksista. Toisaalta katselukulman kasvaessa latvuston rakennetta kuvaavien muuttujien selvittäminen kuvalta vaikeutuu (Rautiainen ym. 2008c).

Mikään yksittäinen kaukokartoitusmenetelmä ei ole täydellinen puulajien erottamiseen tai efektiivisen lehtialaindeksin estimoimiseen. Passiivisten sensorien ongelmina voidaan pitää maanpinnalta tapahtuvaa heijastusta, varjostusta latvuston sisällä, pilvisiä sääolosuhteita, LAI:n saturoitumista suurilla arvoilla sekä sensorien kalibroinnin ja ilmakehäkorjauksen tekemisen vaikeutta (Eriksson ym. 2006). Aktiivisten SAR -tutkien tuottaman datan ongelmat liittyvät kohteen kosteudessa tapahtuviin muutoksiin ja maanpinnan vaihtelevuuteen (Solberg ym. 2009). Menetelmistä lupaavimmalta vaikuttavat ALS -pohjaiset menetelmät, sillä esimerkiksi Solbergin ym. (2009) tutkimuksen mukaan ALS -pulssien (engl. airborne laser scanning) läpäisyaste korreloi vahvasti LAI-2000-laitteella mitatun efektiivisen lehtialan (ja latvuston aukkoisuuden) kanssa. ALS -pohjaisten menetelmien ongelmana on intensiteettitietojen kalibrointi sekä puuttuva ymmärrys koskien signaalien takaisin heijastumista. Tietoa eri puulajien metsiköiden G-funktioista (latvuston aukkoisuudesta) voitaisiin kuitenkin käyttää apuna puulajien erottamiseksi. ALS -menetelmän tarkkuuden rajoitukset ovat samat kuin LAI-2000-laitteella mitatessa, sillä esimerkiksi sironta voi aiheuttaa jopa 20 prosentin aliarvioita efektiiviseen lehtialaindeksiin, ja tämä aliarvio siirtyy ALS -dataan kalibroinnissa. Tällä ei kuitenkaan ole vaikutusta, mikäli tarkoituksena on

seurata esimerkiksi lehtialassa tapahtuvia muutoksia pitkällä aikavälillä. Lisäksi virhe on samansuuruinen koko kuvatulla alueella.

Tuloksien maantieteellisestä toimivuusalueesta on vaikea sanoa mitään varmaa, sillä tutkittavia koealoja oli 13, ja ne sijaitsivat lähellä toisiaan. Parhaimmillaan puulajeille määritellyt G-funktiot pätevät kaikkialla Suomessa. Todennäköisempää kuitenkin on, että tulokset pätevät etelä- ja keskiboreaalisen havumetsävyöhykkeen alueella.

Jatkotutkimusaiheina voidaan pitää sekametsien G-funktioiden selvittämistä ja puulajityypillisten (rakenteellisten) ominaisuuksien vaikutusta G-funktion muotoon. Lisäksi tulee kehittää sovelluksia, joissa tietoa puulajikohtaisista G-funktioista saadaan hyödynnettyä tehokkaasti.

5. Johtopäätökset

G-funktiot voidaan tunnistaa puulajin perusteella käyttäen hyväksi tietoa suhteellisista minimi- ja maksimiarvoista sekä vaihteluvälistä, jolla funktio liikkuu. Kasvukaudenaikaisten muutosten tunnistaminen männiköiden G-funktioista oli suhteellisen pienen lehtialan ja mittausten aikaisten sääolosuhteissa tapahtuneiden muutosten johdosta epäluotettavaa. Myöskään kuusikoiden G-funktiot eivät muuttuneet tarkastelujaksolla mainittavasti. Lehtipuualoilla kasvukaudenaikaiset muutokset G-funktion muodossa olivat sitä vastoin helposti havaittavissa. G-funktion muodon avulla voidaan myös arvioida latvusmuotoa ja ryhmittymistä. Mäntyjen latvusmuoto on approksimoitavissa parhaiten ympyräkartioiden avulla. Kuusien ja koivujen latvusmuodon approksimointiin parhaana vaihtoehtona voidaan pitää ellipsoidia. Nuorena kuusikossa molemmat muotokuoret toimivat yhtä hyvin. Teoreettisten G-funktioiden perusteella männiköiden ja varttuneen kuusikon latvuksissa ei ole havaittavissa selkeää ryhmittymistä (kun G_v keskimäärin 0,5). Nuoren kuusikon tapauksessa G_v :n keskiarvo on kuitenkin simulaatioiden perusteella lähempänä arvoa 0,3. Nuori kuusikko on siis muita metsiköitä ryhmittyneempi.

Lähdeluettelo

- Brock, J.R. 1962. A note on the Beer-Lambert law. *Analytica Chimica Acta* 27: 95 - 97
- Chen, J.M. & Black T.A. 1991. Measuring leaf-area index of plant canopies with branch architecture. *Agricultural and Forest Meteorology* 57: 1-12
- , J.M. & Black T.A. 1992. Defining leaf area index for non flat leaves. *Plant Cell Environment* 15: 421-429
- Deblonde, G., Penner, M. & Royer, A. 1994. Measuring leaf area index with LAI-COR LAI-2000 in Pine Stands. *Ecology* 75(5): 1507-1511
- Deleuze, C., Hervé, J.C., Colin, F. & Ribeyrolles, L. 1996. Modelling crown shape of *Picea abies*: spacing effects. *Canadian Journal of Forest Research* 26: 1957-1966
- Duncan, W.G., Loomis, R.S., Williams, W.A. & Hanau, R. 1967. A model for simulating photosynthesis in plant communities. *Hilgardia* 38: 181-205
- Eriksson, H., Eklundh, L., Kuusk, A. & Nilson, T. 2006. Impact of understory vegetation on forest canopy reflectance and remotely sensed LAI estimates. *Remote Sensing of Environment* 103: 408-418
- Ervasti, S. 2006. Latvusmalli kuuselle ja männylle: latvusmuodon ja -tilavuuden ennustaminen puustotunnuksista. Maisterin tutkielma (metsätieteet). Helsingin yliopisto.
- Geburek, T., Robitschek, K. & Milasowszky, N. 2008. A tree of many faces: Why are there different crown types in Norway spruce (*Picea abies* [L.] Karst.)? *Flora* 203: 126-133
- Godin, C. 2000. Representing and encoding plant architecture: a review. *Annals of Forest Science* 57: 413-438

Gower, S.T. & Norman, J.M. 1991. Rapid estimation of leaf area index in conifer and broadleaved plantations. *Ecology* 72: 1896-1900

-, S.T., McMurtrie, R.E. & Murty, D. 1996. Aboveground net primary production decline with stand age: potential causes. *Trees*, 11: 378-382

Hakkila, P. 1991. Hakkuupoistuman latvusmassa. *Folia Forestalia* 773: 1-24

-, P., Laasasenaho, J. & Oittinen, K. 1972. Korjuuteknisiä oksatietoja. *Folia Forestalia* 147: 1-15

Horn, H.S. 1971. *The adaptive geometry of trees*. Princeton University Press, Princeton, New Jersey

Hynynen, J., Ojansuu, R., Hökkä, H., Siipilehto, J., Salminen, H. & Haapala, P. 2002. Models for predicting stand development in MELA System. Finnish Forest Research Institute, Research Papers 835. s. 116

Jack, S.B. & Long J.N. 1991a. Response of leaf area index to density for two contrasting tree species. *Canadian Journal of Forest Research* 21(12): 1760-1764

-, S.B. & Long J.N. 1991b. Analysis of stand density effects on canopy structure: a conceptual approach. *Trees* 5(1): 44-49

Kellomäki, S., Hari, P., Kanninen, M. & Ilonen, P. 1980. Eco-physiological studies on young Scots pine stands: II. Distribution of needle biomass and its application in approximating light conditions inside the canopy. *Silva Fennica* 14(3): 243-257

-, S. & Oker-Blom, P. 1983. Canopy structure and light climate in a young Scots pine stand. *Silva Fennica* 17(1): 1-21

-, S. & Väisänen, H. 1986. Kasvatustiheyden ja kasvupaikan viljavuuden vaikutus puiden oksikkuuteen taimikko- ja riukuvaiheen männiköissä. *Communicationes Instituti Forestalis Fenniae* 139: 1-38

Kucharic, C.J., Norman, J.M. & Gower, S.T. 1999. Characterization of radiation regimes in non-random forest canopies; theory, measurements, and a simplified modelling approach. *Tree Physiology* 19: 695-706

Kuuluvainen, T. 1992. Tree architectures adapted to efficient light utilization: is there a basis for latitudinal gradients? *Oikos* 65(2): 275-284

Kuusik, A. & Nilson, T. 2000. A directional multispectral forest reflectance model. *Remote Sensing of Environment* 72(2): 244-252

LAI-2000 Plant Canopy Analyzer. Instruction Manual. 1992. [Verkkodokumentti]. Saatavissa: ftp://ftp.licor.com/perm/env/LAI-2000/Manual/LAI-2000_Manual.pdf. [Viitattu 17.10.2010]

Lang, A.R.G. 1991. Application of some Cauchy's theorems to estimation of surface areas of leaves, needles and branches of plants, and light transmittance. *Agricultural and Forest Meteorology* 55: 191-212

Leblanc, S. G. & Chen, J. M. 2001. A practical scheme for correcting multiple scattering effects on optical LAI measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* 110: 125-139

Leverenz, J.W. & Hinckley, T.M. 1990. Shoot structure, leaf area index and productivity of evergreen conifer stands. *Tree physiology* 6: 135-149

Metsäntutkimuslaitoksen fenologiapalvelu. Saatavissa: <http://www.metla.fi/metinfo/fenologia/> [Viitattu 17.10.2010]

Miller, J.B., 1967. A formula for average foliage density. *Australian Journal of Botany*, 15: 141-144

Monsi, M. & Saeki, T. 1953. Über den Lichtfactor in den Pflanzengesellschaften und seine bedeutung für die Stoff-production. *Japanese Journal of Botany* 14: 22-52

NASAn MODIS Website. Saatavissa:

http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproducts.php?MOD_NUMBER=17 [Viitattu 6.11.2009]

Nikinmaa, E. 1992. Analyses of the growth of Scots pine; matching structure with function. Acta Forestalia Fennica 235: 68

Nilson, T. 1971. A Theoretical analysis of the frequency of gaps in plant stands. Agricultural Meteorology 8: 25-38

-, T. 1992. Radiative transfer in nonhomogenous plant canopies. In Advances in Bioclimatology. Vol. 1. s. 59-88

-, T. 1999. Inversion of gap frequency data in forest stands. Agricultural and Forest Meteorology 98-99: 437-448

-, T. & Gemmel, P. 1993. Changes in Growth and Allocation of Growth in Young *Pinus sylevstris* and *Picea abies* due to Competition. Scandinavian Journal of Forest Research 8: 213-222

Oker-Blom, P. 1986. Photosynthetic radiation regime and canopy structure in modelled forest stands. Acta Forestalia Fennica 197.

-, P. & Kellomäki, S. 1982a. Effect of angular distribution of foliage on light absorption and photosynthesis in the plant canopy: Theoretical computations. Agricultural Meteorology 26: 105-116

-, P. & Kellomäki, S. 1982b. Theoretical computations on the role of crown shape in the absorption of light by forest trees. Mathematical Biosciences 59: 291-311

-, P. & Smolander, H. 1988. The ratio of shoot silhouette area to total needle area in Scots pine. Forest Science 34: 894-906

-, P., Kaufmann, M.R., & Ryan, M.G. 1991. Performance of a canopy light interception model for conifer shoots, trees and stands. *Tree Physiology*, Vol. 9, s. 227-243

Ottorini, J.M. 1991. Growth and development of individual Douglas-fir in stands for applications to simulation in silviculture. *Annales des Sciences Forestières* 48: 651-666

Rautiainen, M., Stenberg, P., Nilson, T. & Kuusk, A. 2004. The effect of crown shape on the reflectance of coniferous stands. *Remote Sensing of Environment* 89: 41-52

-, M., Stenberg, P., & Möttöus, M. 2006. Lehtialaindeksin kaukokartoituksesta. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2006

-, M., Möttöus, M., Stenberg, P. & Ervasti, S. 2008a. Crown envelope shape measurements and models. *Silva Fennica* 42(1): 19-33

-, M., Stenberg, P., Heiskanen, J., Möttöus, M., Korhonen, L., Peltoniemi, J., Suomalainen, J., Kaasalainen, S. & Manninen, M. 2008b. Metsän kaukokartoituksen perustutkimus?. *Metsätieteen aikakauskirja* 2/2008

-, M., Lang, M., Möttöus, M., Kuusk, A., Nilson, T., Kuusk, J., & Lökk, T. 2008c. Multi-angular reflectance properties of a hemiboreal forest: An analysis using CHRIS PROBA data. *Remote Sensing of Environment* 112: 2627-2642

-, M. & Heiskanen, J. 2010. Metsän vuodenaikaisvaihtelut satelliittikuvissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 1/2010

Ross, J. 1970. Mathematical models of photosynthesis in a plant stand. Teoksessa: Prediction and measurement of photosynthetic productivity, s 29-45

-, J. 1981. The radiation regime and architecture of plant stands. Dr. W. Junk Publishers, The Hague. s. 391

Rudnicki, M., Lieffers, V.J. & Silins, U. 2003. Stand structure governs the crown collision of lodgepole pine. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 1238-1244

-, M., Silins, U. & Lieffers, V. 2004. Crown cover is correlated with relative density, tree slenderness, and tree height in lodgepole pine. *Forest Science* 50(3): 356-363

Helsingin yliopiston SMEAR -mittausasemien internetsivu. Internet osoite:

<http://www.atm.helsinki.fi/SMEAR/> [Viitattu 15.11.2010]

Smolander, H. & Stenberg, P. 2005. Simple parametrizations of the radiation budget of uniform broadleaved and coniferous canopies. *Remote Sensing of Environment* 94: 355 - 363

Solberg, S., Brunner, A., Holt Hanssen, K., Lange, H., Næsset, E., Rautiainen, M. & Stenberg, P. 2009. Mapping LAI in a Norway spruce forest using airborne laser scanning. *Remote Sensing of Environment* 113: 2317-2327

Stenberg, P. 1996a. Simulations of the effects of shoot structure and orientation on vertical gradients in intercepted light by conifer canopies *Tree physiology* 16: 99-108

-, P. 1996b. Metsikön rakenne, säteilyolot ja tuotos. Helsingin yliopiston metsäekologianlaitoksen julkaisuja 15.

-, P., 1996c. Correcting LAI-2000 estimates for the clumping of needles in shoots of conifers. *Agricultural and Forest Meteorology* 79: 1-8

-, P., 2006. A note on the G-funktion for needle leaf canopies. *Agricultural and Forest Meteorology* 136: 76-79

-, P., Kuuluvainen, T., Kellomäki, T., Grace, J.C., Jokela, E.J. & Gholz, H.L. 1994a. Crown structure, light interception and productivity of pine trees and stands. *Ecological Bulletins* 43: 20-34

-, P., Linder, S., Smolander, H. & Flower-Ellis, J.G.K. 1994b. Performance of the LAI-2000 Plant Canopy Analyzer in Estimating Leaf Area Index of Some Scots Pine Stands. *Tree Physiology* 14: 981-995

-, P., Linder, S. & Smolander, H. 1995. Variation in the Ratio of Shoot Silhouette Area to Needle Area in Fertilized and Unfertilized Norway Spruce Trees. *Tree Physiology* 15: 705-712

-, P., Nilson, T., Smolander, H., & Voipio, H., 2003. Gap fraction based estimation of LAI in Scots pine stands subjected to experimental removal of branches and stems. *Canadian Journal of Remote Sensing* 29: 363-370

Therezien, M., Palmroth, S. Brady, R. & Oren, R. 2007. Estimation of light interception properties of conifer shoots by an improved photographic method and a 3D model of shoot structure. *Tree Physiology* 27: 1375-1387

Validation of land European remote sensing instruments -internetsivu. Internet osoite: <http://w3.avignon.inra.fr/valeri/> [Viitattu 29.10.2010]

Wang, Y.P. & Jarvis, P.G. 1990. Influence of crown structural properties on PAR absorption, photosynthesis, and transpiration in Sitka spruce; application of a model (MAESTRO). *Tree Physiology* 7:297-316.

-, Y.P., McMurtrie, R.E. & Landsberg, J.J. 1992. Modelling canopy photosynthetic productivity. Teoksessa: Baker, J.R. & Thomas, H., *Crop photosynthesis: spatial and temporal determinants*. Elsevier Sci. Publ., The Netherlands, s. 43-67

Welles, J.M., 1990. Some indirect methods of estimating canopy structure. *Remote Sensing Reviews*. 5: 31-43

Wit de, C.T. 1965. Photosynthesis of leaf canopies. *Agricultural research reports* 663, s. 57