

**Puulajien spektrien vertailu ja hyödyntämismahdollisuudet  
kaukokartoituksessa**

Diplomityö  
Rakennetun ympäristön laitos  
Insinöörیتieteiden korkeakoulu  
Aalto-yliopisto

Espoossa 26. toukokuuta 2017

Tekniikan kandidaatti Pekka Raitio

Valvoja: Professori Miina Rautiainen  
Ohjaaja: MMT Arne Hovi

---

**Tekijä** Pekka Raitio

---

**Työn nimi** Puulajien spektrien vertailu ja hyödyntämismahdollisuudet kaukokartoituksessa

---

**Koulutusohjelma** Geomatiikka

---

**Pää-/sivuaine** Fotogrammetria ja kaukokartoitus

---

**Koodi** M3006

---

**Työn valvoja** Professori Miina Rautiainen

---

**Työn ohjaaja(t)** MMT Aarne Hovi

---

**Päivämäärä** 26.05.2017

---

**Sivumäärä** 53

---

**Kieli** Suomi

---

## Tiivistelmä

Borealiset metsät kattavat merkittävän osan maapallon metsistä ja niillä on tärkeä asema maapallon ekosysteemissä. Boreaalisten puulajien spektriaineistoissa on kuitenkin esiintynyt kaksi selvää puutetta. Ensinnäkin monia lajeja ei ole mitattu lainkaan ja toiseksi mittauksissa käytetyt menetelmät ovat vanhentuneita ja huonosti dokumentoituja.

Tässä diplomityössä mitattiin heijastus- ja läpäisyspektrit laboratorio-olosuhteissa yhteensä yli kuudellesadalle lehti- ja neulasnäytteelle 25:stä boreaalisen vyöhykkeen puulajista. Mittaukset suoritettiin tarkasti suunnitelluilla standardoiduilla menetelmillä ja huolellisella aineiston jälkikäsitteilyllä. Mittauskampanjan aikana kasvukaudella 2016 kerättiin poikkeuksellisen laaja spektrikirjasto. Aineisto julkaistaan avoimessa SPECCHIO-spektritietokannassa. Työssä tutkittiin puulajin, latvuston valo-olosuhteiden, lehden tai neulasen puolen, kasvukauden vaiheen ja havupuilla neulasvuosikerran vaikutuksia mitattuihin spektreihin. Tarkoituksena oli määrittää merkittävimmät aallonpituudet, joilla puulajien erottelu lehti- ja neulastasolla on mahdollista sekä selvittää, mitkä muut tekijät vaikuttavat spektreihin. Lisäksi työssä pohdittiin tulosten merkitystä kaukokartoituksen kannalta.

Tulokset osoittavat, että lyhytaaltoisen infrapun (SWIR) merkitys lehti- ja neulastason mittauksissa on aiempaa käsitystä suurempi. SWIR-alueella puulajin havaittiin selittävän jopa 78 prosenttia albedon (heijastus + läpäisy) varianssista havupuulajeilla ja 62 prosenttia lehtipuulajeilla. Lisäksi havupuulajin vaikutus punaisen reunan käännepisteen sijaintiin oli huomattava. Lehden tai neulasen puolen vaikutus korostui lehtipuilla näkyvän valon (VIS) alueella, missä abaksiaalisen puolen albedo oli adaksiaalisen puolen albedo korkeampi. Tutkimuksessa huomattiin neulasten ensimmäisen vuosikerran korkea transmittanssi lähi-infrapun (NIR) ja SWIR-alueilla. Lisäksi vuosikerrat erosivat selvästi vihreän valon alueella, missä toisen vuosikerran absorptio oli ensimmäisen vuosikerran absorptiota korkeampi. Latvuston valo-olosuhteiden vaikutus spektreihin todettiin heikoksi. Kasvukauden vaiheen havaittiin vaikuttavan VIS-alueen absorptioon, NIR-alueen heijastus- ja läpäisyspektreihin sekä punaisen reunan käännepisteen sijaintiin.

Kaistojen väliset korrelaatiot osoittivat, että lehtien ja neulasten spektrit ovat jakautuneet kolmeen leveään aallonpituusryhmään, jotka vastasivat hyvin alueita VIS, NIR ja SWIR. Kapea punaisen reunan alue osoitti kuitenkin näistä ryhmistä poikkeavia piirteitä. Mittauskampanjassa kerättyä spektrikirjastoa voidaan hyödyntää kaukokartoitusaineistojen tulkinnassa. Löydetyt merkittävät aallonpituudet ja niiden väliset korrelaatiot auttavat uusien kaukokartoitusinstrumenttien kanavapaikkojen ja -leveyksien suunnittelussa.

---

**Avainsanat** spektroskopia, hyperspektri, kaukokartoitus, kasvillisuus, puulaji, reflektanssi, transmittanssi, albedo, punainen reuna

---

---

<b>Author</b> Pekka Raitio		
<b>Title of thesis</b> Comparison of tree species spectra and their utilization in remote sensing		
<b>Degree programme</b> Geomatics		
<b>Major/minor</b> Photogrammetry and Remote Sensing	<b>Code</b> M3006	
<b>Thesis supervisor</b> Professor Miina Rautiainen		
<b>Thesis advisor(s)</b> Ph.D. Aarne Hovi		
<b>Date</b> 26.05.2017	<b>Number of pages</b> 53	<b>Language</b> Finnish

---

### Abstract

Boreal forests cover a significant part of the world's forests and play an important role in Earth ecosystem. However, there are two obvious deficiencies in the existing spectral databases of boreal tree species. Firstly, many species lack spectral data. Secondly, the methods used in the measurements are outdated and poorly documented.

In this thesis, reflectance and transmittance spectra of over six hundred leaves and needles from twenty five boreal forests tree species were measured under laboratory conditions. The measurements were carried out using carefully designed standardized procedures and data post-processing. An exceptionally comprehensive spectral library was collected during the measurement campaign over growing season in 2016. The dataset will be published in an open spectral database SPECCHIO. The study examined the effects of tree species, canopy light conditions, leaf or needle side, seasonal variation and needle age on the measured spectra. The aim was to determine the most significant wavelengths for tree species discrimination at the leaf and needle level and to examine which other factors influence the spectra. In addition, the implications of the results for remote sensing were discussed.

The results showed that the importance of short wave infrared (SWIR) region in leaf and needle-level measurements is higher than previously noted. In SWIR region, tree species were found to explain up to 78 percent of variance in leaf albedo (reflectance + transmittance) for coniferous species and 62 percent for broadleaved species. Furthermore, with coniferous species, the influence of species on position of red edge inflection point was found considerable. The effect of leaf or needle side was most noticeable in the visible (VIS) region for broadleaved trees, where the abaxial side albedo was higher than the adaxial side albedo. Further, the results showed high transmittance of first-year needles in the near-infrared (NIR) and SWIR regions. In addition, the needle age clearly differed in green wavelength region where the measurements showed higher absorption for second-year needles. The effect of canopy light conditions on spectra was found to be minor. Seasonal variation had an influence on leaf absorption in VIS, the reflectance and transmittance in NIR, and the position of red edge inflection point.

The band intercorrelation analysis showed that leaf and needle spectra can be characterized into three broad wavelength groups that corresponded well to VIS, NIR and SWIR regions. However, the narrow red edge region showed spectral features that differed from these groups. The spectral database collected during the measurement campaign can be used in interpretation of remote sensing data. Found significant wavelengths and correlations can help in designing of wavelength band locations and widths of new remote sensing instruments.

---

**Keywords** spectroscopy, hyperspectral, remote sensing, vegetation, tree species, reflectance, transmittance, albedo, red edge

---

# Sisällysluettelo

1	Johdanto.....	1
1.1	Tausta .....	1
1.2	Tavoitteet.....	1
1.3	Spektroskopia .....	2
1.3.1	Säteilyn spektri .....	2
1.3.2	Säteilyn vuorovaikutus kasvillisuuden kanssa .....	3
1.3.3	Punainen reuna .....	5
1.4	Kasvillisuuden spektrien mittaukset laboratorio-olosuhteissa.....	6
1.4.1	Spektrikirjastot .....	6
1.4.2	Integroivat pallot spektrimittauksissa.....	8
1.4.3	Neulasmittaukset .....	10
1.4.4	Kaksoispallo .....	11
1.4.5	Lehtien ja neulasten spektreihin vaikuttavia tekijöitä .....	12
2	Aineisto.....	17
2.1	Näytteiden kerääminen.....	17
2.2	Laitteisto.....	20
2.3	Laboratoriomittaukset .....	21
2.3.1	Valmistelut .....	21
2.3.2	Havupuumittaukset.....	22
2.3.3	Lehtipuumittaukset .....	23
3	Menetelmät .....	24
3.1	Aineiston esiprosessointi.....	24
3.1.1	Lehtipuumittaukset .....	24
3.1.2	Havupuumittaukset.....	25
3.2	Suodatus .....	26
3.3	Punaisen reunan käännepisteen määrittäminen .....	26
3.4	Tilastolliset menetelmät .....	26
4	Tulokset ja niiden tarkastelu.....	28
4.1	Spektrien yleispiirteitä .....	28
4.2	Kanavien väliset korrelaatiot.....	30
4.3	Punaisen reunan käännepisteen sijainti .....	32
4.4	Spektreihin vaikuttavien tekijöiden tilastollinen analyysi .....	35
4.5	Spektreihin vaikuttavien tekijöiden laadullinen tarkastelu .....	37
4.5.1	Laji- ja sukuerot.....	37
4.5.2	Lehtien ja neulasten puolierot .....	41

4.5.3	Latvuston valo-olosuhteiden vaikutus .....	42
4.5.4	Neulasvuosikerta .....	44
4.5.5	Kasvukauden vaiheen vaikutus .....	46
5	Johtopäätökset .....	49
	Lähteet .....	51

# 1 Johdanto

## 1.1 Tausta

Kaukokartoituksen merkitys ympäristön seurannassa on kiistaton. Satelliitti-instrumenteilla saadaan nopeasti päivittyvää tietoa kasvillisuudesta, vesistöistä ja ilmakehästä, ja ne mahdollistavat suurten alojen mittaamisen tehokkaasti. Monet käytössä olevista satelliiteista hyödyntävät laajaa spektrin aallonpituusalueita, mutta varsin rajatuilla kanavamäärillä. Lähivuosina useat eri tahot ovat kuitenkin laukaisemassa hyperspektriseen informaatioon erikoistuneita eli useilla kapeilla kanavilla mittaavia satelliitteja kuten PRISMA ja EnMAP (Loizzo et al 2016, Guanter et al. 2016). Molemmat satelliitit monitoroivat ympäristöä noin 250:llä kanavalla näkyvän valon (*visible light, VIS*), lähi-infrapunan (*near infrared, NIR*) sekä lyhytaaltoisen infrapunan (*short wavelength infrared, SWIR*) alueilla. Lisäksi kehitys miehittämättömien lennokkien tekniikassa ja hyperspektrikameroiden koossa ovat avaamassa uuden alustan ympäristötutkimukselle (Torresan et al. 2017, Aasen et al. 2015).

Boreaalisen vyöhykkeen metsät kattavat noin kolmasosan maailman metsistä. Puiden latvustosta heijastuva auringon säteily muodostaa suuren osan metsän kokonaisuheijastuksesta. Heijastuneen säteilyn spektriä hyödyntämällä saamme lisätietoa metsien ekologisesta tilasta ja kykenemme erottamaan puulajeja ja niiden ominaisuuksia toisistaan (Alonzo et al. 2014). Puulajikoostumus vaikuttaa metsän kasvuun, tuotokseen ja taloudelliseen arvoon (Hynynen et al. 2011).

Ymmärtääksemme satelliittien mittaamaa spektritietoa, puulajien tarkat heijastus- ja läpäisyominaisuudet täytyy mitata maan päällä. Tarkka lehti- ja neulastason mittausaineisto antaa mahdollisuuden tutkia eroja ilman, että häiritsevät tekijät kuten ilmakehä tai aluskasvillisuus vaikuttavat mittaukseen. Spektritietoa voidaan hyödyntää kasvillisuuden fysikaalisten heijastus- ja säteilykuljetusmallien parametrissa tai kaukokartoitusaineiston tulkinnassa. Laboratoriossa mitattujen spektrien avulla voidaan muodostaa hypoteeseja siitä, minkälainen sensori on optimaalinen puulajien erottamiseen.

Boreaalisia puulajeja kattavissa, laboratorio-olosuhteissa kerätyissä spektriaineistoissa on esiintynyt selviä puutteita: useita puulajeja ei ole mitattu lainkaan tai mitattu spektrialue on rajoittunut. Erityisesti havupuuspektrien saatavuudessa on puutteita neulasten haastavamman mittauksen takia. Lisäksi olemassa olevat aineistot eivät ole vertailukelpoisia toisistaan poikkeavien ja huonosti dokumentoitujen mittausjärjestelyjen vuoksi.

## 1.2 Tavoitteet

Tässä diplomityössä kerätään lehti- ja neulastason spektrikirjasto 25:stä boreaalisen vyöhykkeen puulajista. Mittauskampanja on laajuudeltaan suurin boreaalisen alueella toteutetuista ja spektriaineisto tullaan julkaisemaan avoimessa, kansainvälisessä SPECCHIO-tietokannassa. Työssä tutkitaan puulajin ja -suvun sekä latvuston valo-olosuhteiden, lehden tai neulasten puolen, kasvukauden ajankohdan ja havupuiden neulasvuosikerran vaikutuksia heijastus- ja läpäisy-spektreihin. Tarkoituksena on määrittää merkittävimmät aallonpituusalueet, joilla puulajien erottelu on mahdollista sekä selvittää, mitkä muut tekijät puulajin lisäksi vaikuttavat spektreihin. Lisäksi pohditaan tulosten merkitystä kaukokartoituksen näkökulmasta. Erityisasemassa tutkimuksessa on kasvillisuuden kannalta mielenkiintoinen punaisen reunan (680–740 nm) spektri. Punaisen reunan merkitystä kasvillisuustutkimuksessa kuvaa uusien Sentinel-2-ympäristösatelliittien kanavajako, missä peräti kolme kanavaa on sijoitettu kapean punaisen reunan alueelle.

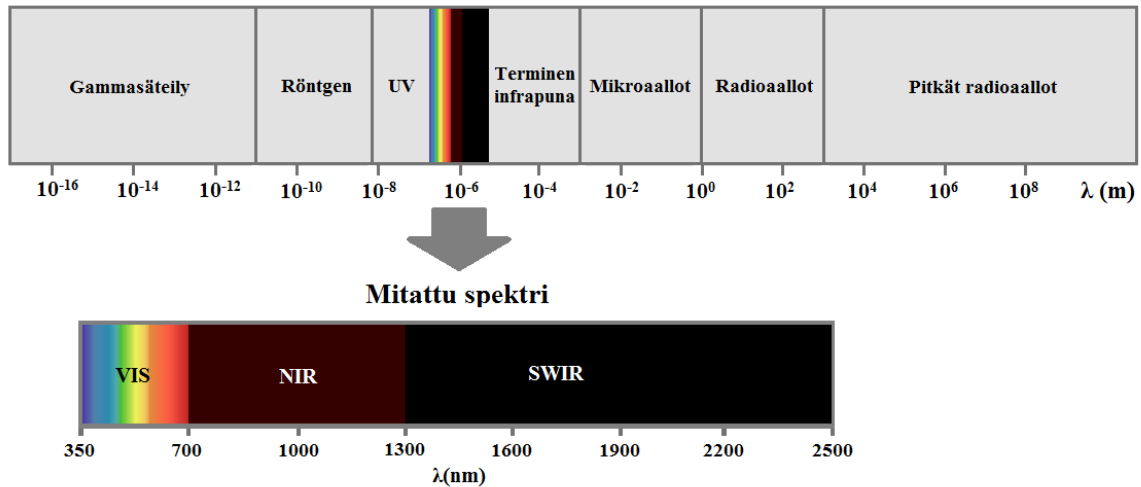
## 1.3 Spektroskopia

### 1.3.1 Säteilyn spektri

Kohteen heijastus eli reflektanssi on kohteesta lähtevän (*radiant exitance*,  $\text{W m}^{-2}$ ) ja siihen tulevan irradianssin (*irradiance*,  $\text{W m}^{-2}$ ) suhde (Schaepman-Strub et al. 2006). Käytännössä, koska kaukokartoitusinstrumenttien mittaama radianssi riippuu valaisu- ja katselugeometriasta, käytetään termiä heijastussuhde (*reflectance factor*), jolla tarkoitetaan kohteesta mitatun säteilyn voimakkuutta suhteessa samassa valaisu- ja katselugeometriassa mitattuun diffuusiin kohteeseen. Tällainen on esimerkiksi laboratoriomittauksissa usein käytetty valkoinen Spectralon-paneeli. Tässä työssä käytetään termejä reflektanssi ja transmittanssi kuvaamaan heijastus- ja läpäisysuhdetta.

Spektroskopiassa mitataan sähkömagneettisen säteilyn ja kohteen vuorovaikutusta. Erityisessä keskiössä on säteilyn aallonpituusjakauma eli spektri, joka riippuu kohteen kemiallisista ja rakenteellisista ominaisuuksista sekä säteilyn ja kohteen pinnan välisestä kulmasta. Nämä ominaisuudet määrittävät kunkin aallonpituuden vuorovaikutusmekanismin kohteen kanssa. Kenttäolosuhteissa mitataan kohteesta sironnutta luonnonvaloa, kun taas laboratorio-olosuhteissa käytetään keinotekoista valonlähdettä. Kohteesta emittoitunut, heijastunut tai sen läpäissyt säteily vastaanotetaan spektrometrillä, joka jakaa säteilyn komponentteihin aallonpituuden perusteella. Komponenttien lukumäärä kertoo mittalaitteen spektraalisen erotuskyvyn eli resoluution. Kohde voi myös absorboida osan saapuneesta säteilystä antaen lisätietoa kohteen ominaisuuksista. Spektritietoa hyödyntävät mittalaitteet voivat tunnistaa kohteen tai sen ominaisuuksia perustuen säteilyn aallonpituusjakaumaan. Spektroskopiolla on useita käyttökohteita monilla eri aloilla kuten ympäristötutkimuksessa, astronomiassa ja teollisuudessa.

Vain osa säteilystä on ihmissilmälle näkyvää. Näkyvä valo, johon usein luetaan myös osa pitkäaaltoisesta ultraviolettisäteilystä, kattaa aallonpituusalueen 350–700 nm. Monet sekä luonnolliset että keinotekoiset säteilylähteet omaavat näkyvää valoa paljon laajemman spektrin (Kuva 1). Hyperspektraalisessa kaukokartoituksessa näkyvän valon lisäksi kiinnostavia alueita ovat erityisesti lähi-infrapuna aallonpituusalueella 700–1300 nm sekä lyhytaaltainen infrapuna aallonpituusalueella 1300–2500 nm. Spektrialueiden tarkat määritelmät vaihtelevat kirjallisuudessa. Edellä mainitut aluerajat ovat valittu diplomityössä käytetyn laitteiston ja kasvillisuusspektrien ominaisuuksien perusteella.



Kuva 1 Sähkömagneettisen säteilyn spektri ja diplomityössä tutkittu aallonpituusalue

### 1.3.2 Säteilyn vuorovaikutus kasvillisuuden kanssa

Säteilyn ja kasvien vuorovaikutuksen ymmärtämisellä on merkittävä rooli kaukokartoituksessa. Vuorovaikutusmekanismi ei riipu ainoastaan säteilyn aallonpituudesta ja tulokulmasta, vaan myös kasvin rakenteellisista ja kemiallisista ominaisuuksista kuten lehtien paksuudesta, muodosta, veden määrästä ja rakennealkioiden jakaumasta kasvin sisällä (Jones ja Vaughan 2010). Määritettäessä lehtien tai neulasten optisia ominaisuuksia on syytä huomioida näytteen yläpuolen (adaksiaalinen puoli) ja alapuolen (abaksiaalinen puoli) väliset eroavaisuudet, mitä voi esiintyä pinnan karkeuksissa, lehtikarvoissa tai vahakerroksissa. (Lukeš et al. 2013).

Lehtien ja neulasten spektroskooppisessa tutkimuksessa tietyt lajeille yhteiset pääpiirteet toistuvat kasvien reflektanssi-, transmittanssi- ja absorptiospektreissä (Kuva 2). Näkyvän valon alueella absorptio on voimakkainta sinisen ja punaisen valon alueella pigmenttien absorptio seurauksena. Pigmentit absorboivat vähiten vihreän valon alueella, mistä johtuu lehdille tyypillinen vihreä väri. NIR-alueella kasvien heijastus ja läpäisy ovat voimakkainta, minkä vuoksi monet ympäristösatelliitit hyödyntävät kyseistä spektrialuetta. NIR-alueella lehtien absorptio on heikkoa, koska pigmenttien, veden ja muiden kemiallisten aineiden vaikutukset ovat pieniä. Korkea NIR-alueen reflektanssi ja transmittanssi johtuvat lehden rakenteellisista ominaisuuksista sekä soluseinämien komponenteista. Lähi-infrapuna pidemmille aallonpituuksille siirryttäessä heijastus ja läpäisevyys laskevat, mutta riippuvat proteiini-, ligniini- ja selluloosapitoisuuksista. Veden absorptiopiikit SWIR-alueella ovat lähes kaikelle kasvillisuudelle tyypilliset. (Jones ja Vaughan 2010)

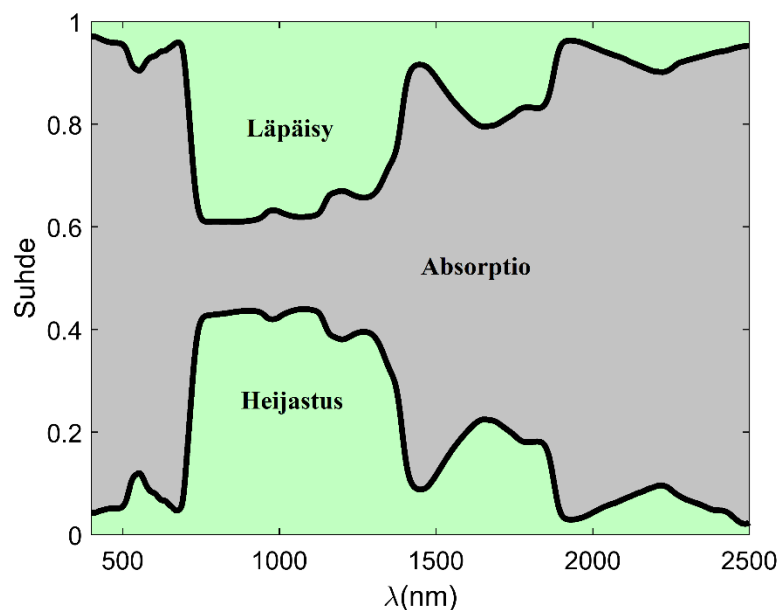
Diplomityössä mitattiin lehtien ja neulasten reflektanssia ja transmittanssia mittausingometriassa, jossa säteily kohdistetaan suoraan näytteeseen ja mitataan koko puoliavaruuteen heijastuvaa tai läpäistyvää säteilyä. Englanniksi käytetään termejä *hemispherical-directional reflectance factor (DHRF)* ja *hemispherical-directional transmittance factor (DHTRF)* (Schaepman-Strub et al. 2006). Kaukokartoituksessa on usein mielekästä tutkia kohteen reflektanssin ja transmittanssin summaa *albedo* ( $\omega$ ), joka kuvaa kohteeseen saapuneen ja siitä lähteneen säteilyn suhdetta. Lehti- ja neulastason spektrit toimivat perusalkioina metsän al-

bedospektrin tulkinnassa kaukokartoitusaineistosta, mutta satelliittimittauksissa täytyy huomioida useita muitakin tekijöitä. Kohteen ja instrumentin pitkästä välimatkasta sekä muista tekijöistä johtuen, signaalin spektraalinen, spatiaalinen ja radiometrinen erotuskyky ovat rajoitetut.

Osa kohteesta heijastuneesta säteilystä siroaa kulkiessaan ilmakehän läpi. Tällä on erityisen suuri vaikutus optisilla aallonpituuksilla, joita kasvillisuuden tutkimisessa yleensä käytetään. Sironta heikentää kohteesta instrumentille saapuvan säteilyn määrää ja vastaavasti lisää kohteen ulkopuolelta tullutta säteilyä. Lisäksi ilmakehän kaasut absorboivat aineelle ominaisia taajuuksia rajoittaen käytettävissä olevaa aallonpituusalueetta. Esimerkiksi vesihöyryn absorptiopiikit SWIR-alueella häiritsevät kasvien ominaisuuksien määrittystä kyseisillä aallonpituuksilla. Myös sääolosuhteet, erityisesti pilvisuus, vaikuttavat laadukkaan kaukokartoitusaineiston saatavuuteen.

Kasvillisuuden spektrin mittausta rajoittavat useat instrumentin ominaisuudet. Kun laboratorio-olosuhteissa mittausaikaa voidaan säätää vapaasti, kaukokartoituksessa integrointiaika kuva-alkiota kohden on rajoitettu. Riittävä integrointiaika on edellytys tarvittavan signaalikohinasuhteen saavuttamiseksi. Instrumentit kärsivät aina laitteen ja ympäristön aiheuttamasta kohinasta. Riittävän signaalikohinasuhteen saavuttaminen on ollut rajoittava tekijä hyperspektraalisessa kaukokartoituksessa, missä instrumentille saapuva säteilyteho jaetaan sadoille erillisille kanaville (Jones ja Vaughan 2010).

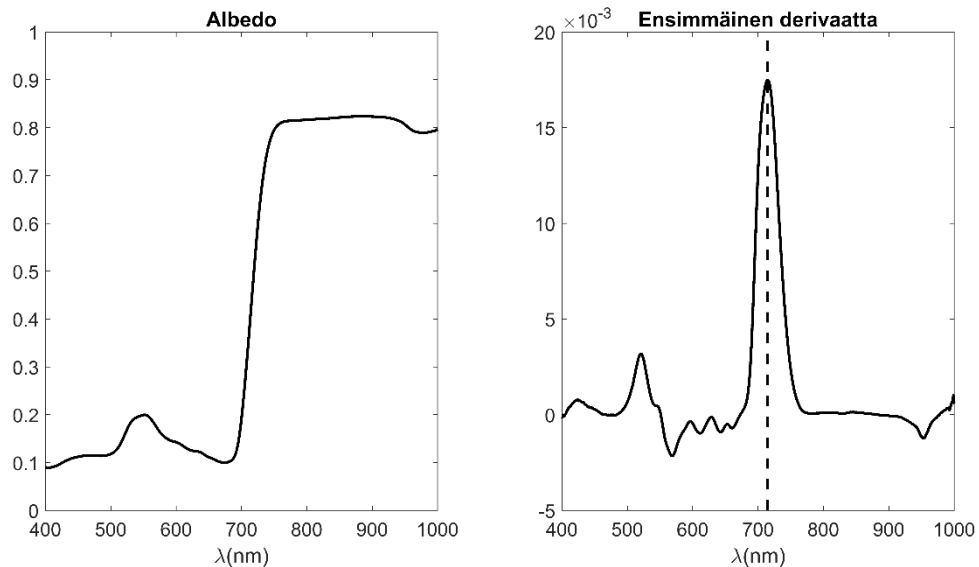
Merkittävä rajoittava tekijä spektritutkimuksessa on spatiaalinen resoluutio, joka satelliittinstrumenteilla on tyypillisesti joitakin kymmeniä metrejä. Kasvien ominaisuuksien luokittelu ja tulkinta ovat haastavia, koska yhteen pikseliin mahtuu useita lajeja, kasvillisuuskerroksia sekä paljasta maata, kiveä tai vettä. Mitattu pikselin arvo on osatekijöiden summa. Lisäksi auringon kulma sekä valo- ja varjo-olosuhteiden vaihtelut pikselin sisällä vaikuttavat mitattuun metsän heijastuskertoimeen. Myös kasvillisuuden rakenne ja elementtien, kuten lehtien, neulasten tai oksien, orientaatio vaikuttavat satelliittimittauksiin aallonpituudesta ja katselukulmasta riippuen (Disney et al. 2006).



Kuva 2 Kasvillisuudelle tyypilliset heijastus-, läpäisy- ja absorptiospektrit aallonpituuden ( $\lambda$ ) funktiona

### 1.3.3 Punainen reuna

Kasvillisuudelle tyypillistä reflektanssin ja transmittanssin jyrkkää kasvua siirryttäessä punaisesta valosta kohti lähi-infrapunaa (680–740 nm) kutsutaan termillä *punainen reuna* (*red edge*). Punaisen reunan käänne pisteen (*red edge inflection point (REIP)*), missä nousu on jyrkintä, paikka vaihtelee yleensä välillä 710–720 nm. Sen tiedetään olevan erityisen herkkä klorofyllipitoisuuksille, mutta myös ympäristötekijöiden on todettu vaikuttuvan käänne pisteen sijaintiin. *REIP*:n määrittäminen perustuu yksinkertaisimmillaan spektrin ensimmäiseen derivaattaan, josta ratkaistu maksimi arvo kuvaa alkuperäisen spektrin suurinta muutosta (kuva 3). (Jones ja Vaughan 2010).



Kuva 3 Vasemmalla männyn neulasen albedo, oikealla albedon ensimmäinen derivaatta ja maksimi arvo ( $REIP = 715 \text{ nm}$ )

Cho ja Skidmore (2006) tutkivat yhteyttä lehtien typpipitoisuuksien ja eri menetelmillä laskettujen *REIP*:n arvojen välillä. Derivaatan maksimiin perustuvan menetelmän ongelmaksi muodostuivat punaisen reunan mahdolliset useat lähekkäiset huiput, joita on aikaisemmissa tutkimuksissa löydetty jopa neljä (Gitelson et al. 1995). Yhden maksimin määrittäminen ei välttämättä riitä punaisen reunan ja siihen liittyvien kasvin ominaisuuksien tulkintaan.

Cho ja Skidmore (2006) vertailivat derivaatan maksimin lisäksi neljää eri menetelmää *REIP*:n ratkaisemiseksi. Yksi perustui reflektanssispektrin lineaariseen tulkintaan, kaksi derivaattaspektrin ja moniasteisten käyrien yhteensovituksen ja neljäs perustui derivaatan huipun ympärille sovitettujen suorien leikkauspisteen määrittämiseen. Kaikki menetelmät antoivat samansuuntaisia tuloksia, mutta viimeisimpänä mainittu menetelmä suoriutui parhaiten varhaisessa kehitysvaiheessa olevien kasvien ja alhaisten typpipitoisuuksien tulkinnassa. Menetelmästä riippumatta luotettava punaisen reunan määrittäminen vaatii korkean spektraalisen resoluution, mikä rajoittaa monien kaukokartoitus satelliittien käyttöä.

## **1.4 Kasvillisuuden spektrien mittaukset laboratorio-olosuhteissa**

### **1.4.1 Spektrikirjastot**

Metsien kaukokartoituksen kannalta on oleellista ymmärtää valon vuorovaikutusmekanismit kasvien kanssa. Tätä varten on muodostettava tarkkoja ja kattavia spektritietokantoja eli spektrikirjastoja, joista löytyy lajikohtaisten erojen lisäksi tietoa muista spektriin vaikuttavista seikoista, kuten kasvin iästä ja ympäristötekijöistä. Lisäksi tietokannan metatiedot näytteiden määrästä ja hajonnasta helpottavat aineiston käyttäjiä (Price, 1994).

Nykyiset spektritietokannat kattavat heikosti boreaalisen vyöhykkeen puulajeja. Taulukossa 1 on listattu diplomityön mittauskampanjan puulajit sekä niiden saatavuus yleisimmistä spektrikirjastoista. Monet tietokannat ovat melko vanhoja ja metatieto huonosti dokumentoitua. Lisäksi spektripankit ovat muodostettu eri mittalaitteiden ja menetelmien avulla, mikä tekee aineistojen vertailun epäluotettavaksi. Aivan viime aikoina spektriaineistoja on kuitenkin ruvettu kokoamaan yhtenäisiksi tietokannoiksi, jotka palvelevat eri alojen tutkijoita. EcoSIS<sup>1</sup> ja SPECCHIO<sup>2</sup> ovat avoimia tietokantoja, joiden keräämiseen on osallistunut eri yliopistoja ja yrityksiä. Myös diplomityön mittauskampanjassa syntynyt aineisto tullaan lisäämään SPECCHIO-tietokantaan.

---

<sup>1</sup> [www.ecosis.org](http://www.ecosis.org)

<sup>2</sup> [www.specchio.ch](http://www.specchio.ch)

Taulukko 1 Lajikohtaisten spektrien saatavuus nykyisistä spektritietokannoista

	USGS Spectroscopy Lab <sup>3</sup>	SNF Leaf Optical Properties: Cary-14 <sup>4</sup>	Leaf Optical Properties Experiment (LOPEX93) <sup>5</sup>	BOREAS <sup>6</sup>
<i>Abies balsamea</i>		350 – 2100 nm		
<i>Abies sibirica</i>				
<i>Acer platanoides</i>				
<i>Alnus glutinosa</i>			400 – 2500 nm	
<i>Alnus incana</i>				
<i>Betula papyrifera</i>		350 – 2100 nm		
<i>Betula pendula</i>			400 – 2500 nm	
<i>Larix gmelinii</i>				
<i>Larix laricina</i>		350 – 2100 nm		
<i>Larix sibirica</i>				
<i>Picea abies</i>			400 – 2500 nm	
<i>Picea glauca</i>		350 – 2100 nm		400 – 1000 nm
<i>Picea mariana</i>		350 – 2100 nm		400 – 1000 nm
<i>Pinus banksiana</i>		350 – 2100 nm		400 – 1000 nm
<i>Pinus contorta</i>	300 – 2500 nm		400 – 2500 nm	
<i>Pinus sylvestris</i>				
<i>Populus balsamifera</i>				
<i>Populus tremula</i>			400 – 2500 nm	
<i>Populus tremuloides</i>	300 – 2500 nm	350 – 2100 nm		400 – 1000 nm
<i>Prunus padus</i>				
<i>Psuedotsuga menzeisii</i>	300 – 2500 nm		400 – 2500 nm	
<i>Quercus robur</i>	300 – 2500 nm			
<i>Salix caprea</i>				
<i>Sorbus aucuparia</i>				
<i>Tilia cordata</i>				
<b>Mitatut ominaisuudet</b>	<i>R</i>	<i>R</i> ja <i>T</i>	<i>R</i> ja <i>T</i>	<i>R</i> ja <i>T</i> , molemmat puolet
<b>Mittalaitteet</b>	ASD Fieldspec -spektrometri	Cary-14 -spektrometri	Perkin Elmer Lambda 19 -spektrometri, integroiva pallo (tuntematon)	Spectron Engineering SE590 -spektrometri, LI-COR LI-1800-12 - integroiva pallo

<sup>3</sup> <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06/ds231/datatable.html>

<sup>4</sup> [http://daac.ornl.gov/SNF/guides/leaf\\_optical\\_properties\\_cary14.html](http://daac.ornl.gov/SNF/guides/leaf_optical_properties_cary14.html)

<sup>5</sup> [http://ies-webarchive-ext.jrc.it/ies/uploads/fileadmin/H03/LOPEX\\_Jan09.zip](http://ies-webarchive-ext.jrc.it/ies/uploads/fileadmin/H03/LOPEX_Jan09.zip)

<sup>6</sup> [http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds\\_id=531](http://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=531)

## 1.4.2 Integroivat pallot spektrimittauksissa

Spektripankin muodostamiseksi puulajien lehdet tai neulaset mitataan yleensä suljetussa ympäristössä, missä valaistusolosuhteet saadaan standardoitua ja mittausten toistettavuus säilyy. Vaihtoehtoisesti mittauksia on suoritettu myös luonnossa asettamalla spektrometrin vastaanotin osoittamaan kohti lehteä, oksaa tai muuta kasvielementtiä (Jääskeläinen et al. 1994, Rautiainen et al. 2011). Jälkimmäisessä tapauksessa lehtinäytteen irrottamisesta ja säilyttämisestä koituvat metaboliset ja rakenteelliset muutokset lehdessä saadaan minimoitua. On kuitenkin tutkittu, ettei irrotettujen lehtien lyhytaikainen säilytys viileässä aiheuta huomattavaa muutosta näytteiden spektriin (Daughtry et al. 1984).

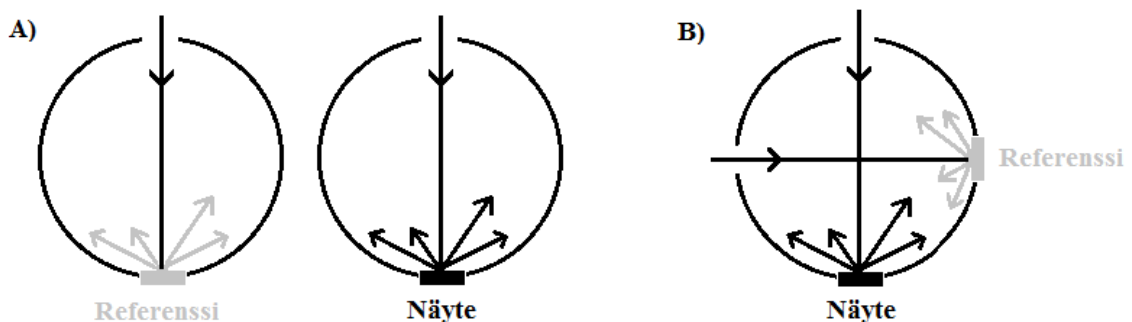
Lehtien ja neulasten kokonaisheijastuksen ( $R$ ) ja -läpäisyn ( $T$ ) mittauksissa käytetään yleisesti yksittäistä integroivaa palloa, jonka näyteportteihin (*sample port*) kiinnitetään sekä valonlähde että näyte tai tunnettu referenssikohde (Goebel 1967). Mittausjärjestelyn voi suorittaa kahdella tavalla: vertailumenetelmällä (*comparison sphere*) tai korvaamisenetelmällä (*substitution sphere*). Korvaamisenetelmässä heijastusmittaukset kalibroidaan mittaamalla erikseen referenssikohdetta ja näytettä (kuva 1-A). Järjestelyssä pallon sisäpinnan heijastus kuitenkin muuttuu näyteaukon osalta, mikä vaikuttaa pallon heijastuskertoimeen. Mittausyhtälö korvaamisenetelmälle on (Carr 1997):

$$\frac{L_S}{L_R} = \frac{\rho_S}{\rho_R} \frac{1-\rho_S}{1-\rho_R}, \quad (1)$$

missä  $L_S$  ja  $L_R$  ovat spektrometrin mittaamat säteilytehot näytteelle ja referenssille,  $\rho_S$  ja  $\rho_R$  ovat näytteen ja referenssin heijastuskertoimet,  $\rho'_S$  ja  $\rho'_R$  ovat pallon heijastuskertoimet mitattaessa näytettä ja referenssiä.

Vertailumenetelmässä (kuva 1-B) näyte ja referenssikohde sijoitetaan samanaikaisesti palloon, minkä ansiosta pallon sisäpinnan heijastuskerroin säilyy muuttumattomana. Mittausyhtälö vertailumenetelmälle sievenee aiemmasta muotoon

$$\frac{L_S}{L_R} = \frac{\rho_S}{\rho_R} \quad (2)$$



Kuva 4 Reflektanssin mittausasetelma A) Korvaamisenetelmällä B) Vertailumenetelmällä

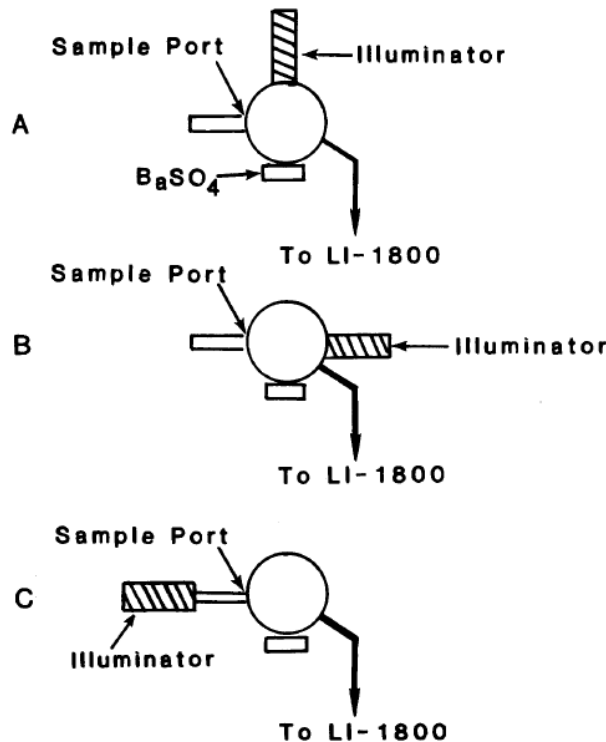
Transmittanssimittaukset suoritetaan vastaavasti, mutta näyte sijoitetaan samaan porttiin valonlähteen kanssa. Kalibrointi tapahtuu mittaamalla valkoisen referenssin ja näytteen heijastukset (Carr 1997).

Daughtry et al. (1989) esitti yksittäisen integroivan pallon vertailumenetelmään perustuvan tavan mitata lehti- ja neulasnäytteitä. Tutkimuksessa hyödynnettiin LI-COR LI-1800 -spektrometriä ja saman valmistajan integroivaa palloa. Pallon sisäpinta ja referenssinäyte oli maalattu valkoisella bariumsulfaatilla ( $\text{BaSO}_4$ ), jonka heijastussuhde tunnetaan. Referenssimittauksen tarkoituksena on kalibroida mittalaite tunnetun kohteen avulla. Näytteen, referenssin ja valonlähteen paikat integroivassa pallossa on esitetty kuvassa 5. Referenssi-, reflektanssi- ja transmittanssimittauksen lisäksi määritetään hajavalon (*straylight*) vaikutus mittaustulokseen. Se ratkaistaan suorittamalla reflektanssimittaus ilman näytettä, jolloin ei-toivottu, pieni heijastuskomponentti saadaan selville ja sen vaikutus vähennettyä varsinaisesta mittauksesta. Lasketut heijastus- ja läpäisykertoimet  $R$  ja  $T$  ratkaistaan mittauksista kaavoilla:

$$R = \frac{F_R - F_S}{F_{WR} - F_S} \frac{\rho_r}{G} \quad (3)$$

$$T = \frac{F_T}{F_{WT} - F_S} \frac{\rho_r}{G}, \quad (4)$$

missä  $F_R$ ,  $F_T$  ja  $F_S$  ovat reflektanssi-, transmittanssi- ja hajavalomittauksista saadut säteilytehot,  $F_{WR}$  ja  $F_{WT}$  ovat reflektanssin ja transmittanssin referenssimittauksista saadut säteilytehot,  $\rho_r$  on referenssipinnan ( $\text{BaSO}_4$ ) heijastuskerroin (= 0,980 (LI-COR 1983)),  $G$  on funktio, joka huomioi pallon sisäpinnan heijastuskertoimen keskimääräisen muutoksen referenssi- ja näytemittauksen välillä. Vertailumenetelmällä  $G \approx 1$ . (Daughtry et al. 1989)



Kuva 5 Näytteen, tunnetun referenssikohteen sekä valonlähteen paikat A) Referenssimittauksessa B) Reflektanssimittauksessa C) Transmittanssimittauksessa (Daughtry et al. 1989)

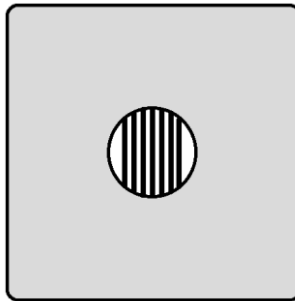
Spektrimittauksissa ei yleensä mitata näytteen absorptiota. Koska ideaalisissa tapauksissa kaikki palloon kohdistettu säteily absorboituu näytteeseen tai heijastuu tai läpäisee sen, voidaan absorptio ( $A$ ) ratkaista reflektanssin ( $R$ ) ja transmittanssin ( $T$ ) arvoista kaavalla

$$R + T + A = 1 \quad (5)$$

### 1.4.3 Neulasmittaukset

Integroivia palloja käytettäessä valonlähde kohdistetaan näyteporttiin, johon neulasnäyte asetellaan hyödyntäen erillistä näytetelinettä, sillä kapeat neulaset eivät täysin riitä peittämään näyteporttia. Koko portin peittäväillä lehtinäytteillä telinettä ei tarvita. Onnistuneessa neulasmittauksessa on tärkeää ratkaista neulasten kanssa vuorovaikuttavan säteilyn osuus aukkoon kohdistuvasta kokonaissäteilystä.

Daughtryn et al. (1989) esittämässä ratkaisussa neulaset maalattiin absorboivalla maalilla ja aseteltiin aukkoon vierekkäin, noin yhden neulasen leveyden etäisyydelle toisistaan (kuva 6). Spektrometrin vastaanottama säteilyteho laski suhteessa absorboivien neulasten pinta-alaan. Ennen maalausta, neulasten  $R$  ja  $T$  ratkaistiin mittaamalla spektri normaalisti. Lopullinen spektri laskettiin painottamalla  $R$ :n ja  $T$ :n arvoja maalimittauksista ratkaistun tehon muutoksen avulla. Menetelmän tarkkuutta testattiin vertaamalla kokonaisen lehden sekä lehdestä leikattujen ohuiden suikaleiden antamia mittaustuloksia. Erot olivat maksimissaan 3 % koko mitatulla 400–1100 nm alueella.



Kuva 6 Seitsemän neulasen muodostelma integroivan pallon aukossa

Samassa tutkimuksessa esiteltiin menetelmä lyhyiden neulasten kuten mustakuusen (*Picea mariana*) neulasten spektrimittaukseen. Tässä lisäongelmaksi muodostuvat aukon halkaisijaa lyhyemmät neulaset, joita ei saa pitkien neulasten tapaan kiinnitettyä aukon molempiin reunoihin. Ratkaisussa neulaset kiinnitettiin läpinäkyvän teipin avulla näytetelineeseen. Lopullinen spektri ratkaistiin mittaamalla sekä neulasten että teipin heijastusominaisuudet.

Mesarch et al. (1999) käyvät tarkemmin läpi aukkosuhteen ( $AS$ ) vaikutusta laskettuihin reflektanssin ja transmittanssin arvoihin. Daughtryn et al. (1989) menetelmä, jossa neulaset aseteltiin yhden neulasen leveyden päähän toisistaan ( $AS \approx 50\%$ ), näytti systemaattisesti yliarvioivan  $R$ :n arvoja ja aliarvioivan  $T$ :n arvoja. Mesarchin et al. (1999) tutkimuksessa testattiin erikokoisia neulasvälejä ( $AS \approx 10\text{--}50\%$ ). Lisäksi artikkelissa esitellään uusi, nopeampi tapa aukkosuhteen määrittämiseksi hyödyntäen digitaalikuvia.

Aukkosuhteen laskeminen digitaalikuvilta on monivaiheinen prosessi (Mesarch et al. 1999). Aluksi näyteteline neulasineen kuvataan. Kynnysarvon avulla kaikki kuvan pikselit jaetaan kahteen luokkaan, näytteeksi tai taustaksi. Seuraavaksi luodaan näytetelinettä ja valokeilaa vastaava digitaalinen maski, joka asetetaan näytekuvaan päälle. Syntyneestä kuvasta lasketaan aukkoon jäävien neulaspikeleiden suhde kaikkiin aukon pikseleihin. Vastaavaa menetelmää  $AS$ :n laskemiseksi on käytetty useissa myöhemmissä spektritutkimuksissa (Yáñez-Rausell et al. 2014, Lukeš et al. 2013).

Neulasmittauksissa, joissa näyte ei täysin peitä valokeilaa,  $R$ :n ja  $T$ :n arvot johdetaan kaavoista (2) ja (3):

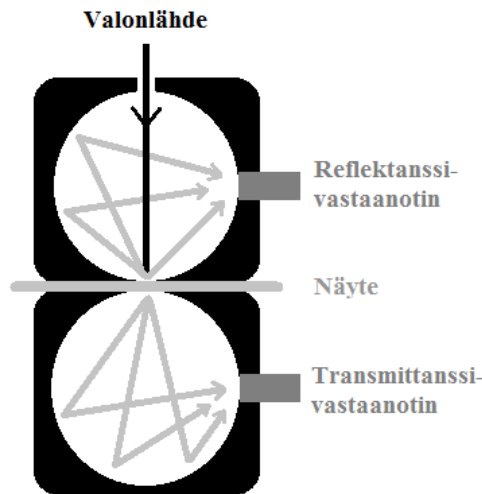
$$R = \left[ \frac{F_R - F_S}{F_{WR} - F_S} \frac{\rho_r}{G} \right] \frac{1}{1 - AS} \quad (6)$$

$$T = \left[ \frac{F_T}{F_{WT} - F_S} \frac{\rho_r}{G} - \rho_r AS \right] \frac{1}{1 - AS} \quad (7)$$

Mesarch et al. (1999) tutki aukkosuhteen vaikutusta mittaustulokseen. Tutkimuksessa selvisi pienen aukkosuhteen ( $AS \approx 10\text{--}15\%$ ) tuottavan luotettavampia tuloksia ja pienentävän hajontaa otosten välillä. Suuren aukkosuhteen aliarvioiva vaikutus transmittanssiin, erityisesti näkyvällä alueella, näytti myös katoavan, mutta reflektanssin arvot kasvoivat hieman ”todellisista” arvoista. Tosin ongelma yliarvioitujen heijastusarvojen kanssa oli selvästi pienempi, kuin aikaisempi ongelma aliarvioidun transmittanssin kanssa. Nousut  $R$ :n arvo pienillä  $AS$ :n arvoilla selittynee neulasten välisellä monisironnalla, joka kasvaa aukkosuhdetta pienennettäessä (Daughtry et al. 1989, Mesarch et al. 1999, Yáñez-Rausell et al. 2014).

#### 1.4.4 Kaksoispallo

Yksittäisen integroivan pallon sijasta voidaan käyttää kaksoispalloa (Pickering et al. 1992). Menetelmässä näyte asetellaan kahden pallon väliin, joista ensimmäisessä mitataan näytteen reflektanssi ja toisessa transmittanssi. Asetelma muistuttaa kahta samanaikaista, yksittäisen integroivan pallon korvausmenetelmällä suoritettavaa mittausta (kuva 7).



Kuva 7 Kaksoispallon yksinkertaistettu toimintaperiaate

Valonlähde suunnataan reflektanssipallon aukosta kohti näytettä, josta osa säteilystä peiliheijastuu ja osa heijastuu diffuusisti. Kaksoispallomittauksessa kolmas heijastusmittaukseen vaikuttava komponentti syntyy, kun osa transmittanssipalloon saapuneesta säteilystä kulkeutuu takaisin reflektanssipalloon. Vastaavat vuorovaikutusmekanismit vaikuttavat myös transmittanssimittaukseen. Vastaanottimien mittaamat säteilytehot ratkaistaan kaavoista

$$P_d = \delta \frac{R_{cd} + mR_c + T'(T_{cd} + m'T_c)}{V(1 - TT')} P \quad (8)$$

$$P'_d = \delta' \frac{T_{cd} + mT_c + T(R_{cd} + mR_c)}{V'(1 - TT')} P, \quad (9)$$

missä heittomerkki viittaa transmittanssipalloon ja ilman heittomerkkiä varustetut suureet viittaavat reflektanssipalloon.  $\delta$  on vastaanotinaukon pinta-alan osuus pallon kokonaispinta-

alasta,  $R_{cd}$  ja  $T_{cd}$  ovat näytteen diffuusin heijastuksen ja läpäisyn kertoimet,  $R_c$  ja  $T_c$  ovat näytteen peiliheijastuksen ja suoran läpäisyn kertoimet,  $m$  on pallon sisäpinnan heijastuskerroin,  $T$  on läpäisykerroin valon kulkiessa edestakaisin pallojen välillä,  $P$  on näytteeseen kohdistetun valonlähteen teho ja  $V$  on signaalin heikkenemistä kuvaava termi:

$$V = 1 - (m\alpha + R_d s + r h), \quad (10)$$

missä  $\alpha$  on pallon heijastavan pinta-alan osuus kokonaispinta-alasta,  $R_d$  on näytteen diffuusi heijastuskerroin,  $s$  on näyteportin pinta-alan osuus pallon kokonaispinta-alasta,  $r$  on vastaanottimen ja valaistusportin keskimääräinen heijastuskerroin ja  $h$  on vastaanottimen ja valaistusportin osuus kokonaispinta-alasta. Kaavojen (8) ja (9) johtaminen ja tarkastelu on esitetty tutkimuksessa (Pickering et al. 1992).

Integroivien pallojen mittauksissa näytteen ja vastaanottimen väliin voidaan asettaa vaimennin (*baffle*), joka estää peiliheijastuksen suoran päätyminen vastaanottimelle. Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää anisotrooppista vastaanotinta, jonka rajattu mittauskulma estää valonlähteen suoran vaikutuksen, peiliheijastuksen sekä peiliheijastuksen ensimmäisen diffuusin heijastuksen vastaanottimeen. Anisotrooppisen vastaanottimen tapauksessa kaavojen (8) ja (9) oikealle puolelle täytyy lisätä kerroin  $f m \alpha$  (tai  $f' m' \alpha'$ ), missä  $f$  on vastaanotinkohtainen, katselukulmasta riippuva vakio. (Pickering et al. 1992).

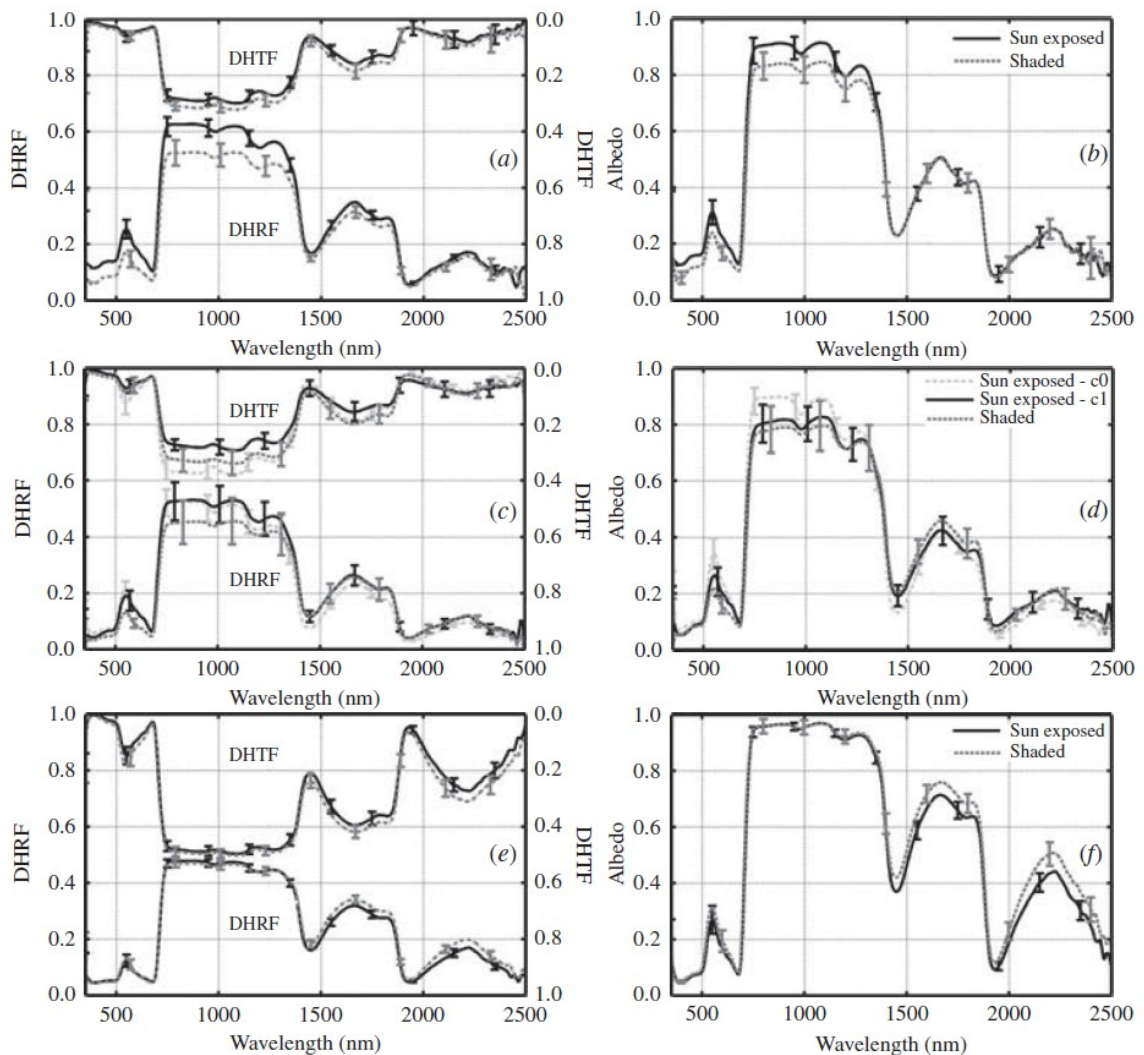
Näytteen heijastus- ja läpäisykertoimet ovat suhteellisia arvoja, jotka ratkaistaan referenssimittauksen avulla. Kaksoispallo kalibroidaan mittaamalla reflektanssi Lambertin pinnan kaltaisesta, korkean heijastuskertoimen referenssikohteesta ( $R_{ref} = R_{cd} = R_d, R_c = 0$ ) sekä mittaamalla reflektanssi tyhjällä näyteportilla ( $R_{cd} = R_d = R_c = 0$ ). Transmittanssipallo kalibroidaan tyhjällä näyteportilla ( $T_c = T_d = 1, T_{cd} = 0$ ). Lisäksi kaikista mittauksista vähennetään ilmaisimen lämpökohinan, pimeän virran (*dark current*) osuus sekä reflektanssimittauksista vielä vastaanottimelle päätyneen hajavalon osuus.

#### 1.4.5 Lehtien ja neulasten spektreihin vaikuttavia tekijöitä

Eurooppalaisista boreaalisen vyöhykkeen puulajeista, erityisesti havupuista, spektridataa on saatavilla hyvin rajoitetusti. Lukeš et al. (2013) mittasi vyöhykkeen kolmen puulajin metsämännyn (*Pinus sylvestris*), metsäkuusen (*Picea abies*) ja rauduskoivun (*Betula pendula*) spektreja Suomessa keskikesällä 2012. Mittauskampanjassa näytteitä kerättiin kymmenestä eri puusta jokaista lajia kohden. Puut oli valittu kolmesta eri sijainnista puiden luonnollisen vaihtelun varmistamiseksi. Jokaisesta puusta leikattiin kaksi oksaa: toinen latvuston varjosisesta osasta ja toinen valolle altistuvasta osasta. Männyn neulasnäytteet valittiin edellisen vuoden neulasista, kun taas kuusen osalta tutkittiin sekä edellisen että vallitsevan vuoden neulasia. Koivunlehdet olivat kaikki täysin kehittyneitä.

Lukeš et al. (2013) mittasi näytteet laboratoriossa vertailumenetelmällä käyttäen ASD FieldSpec 3 PRO -spektrometriä ja ASD RTS-3ZC -integroivaa palloa. Laitteen mittausalue on 350–2500 nm ja spektraalinen resoluutio 3 nm 700:aan nm asti ja 10 nm tätä pidemmille aallonpituuksille. Jokaisen näytteen spektri muodostettiin keskiarvoistamalla 30 peräkkäistä mittausta. Koivu- ja mäntynäytteet mitattiin molemmin puolin, koska eri puolien rakenteellisten eroavaisuuksien on todettu vaikuttavan kasvin spektriin. Aukkosuhde ratkaistiin Mesarchin et al. (1999) tapaan digitaalisen maskin avulla. Nyt digitaalikameran tilalla käytettiin skanneria ja pikseliarvojen kynnystyksessä Otsun (1979) menetelmää.

Kuvassa 8 on esitetty Lukešin et al. (2013) mittauskampanjan tulokset spektrien osalta. Suurimmat reflektanssin ja transmittanssin arvot mitattiin koivusta. Myös näytteiden välinen vaihtelu oli pienintä koivulla. Luonnollisten tekijöiden lisäksi havupuiden voimakkaampi vaihtelu saattaa selittyä aukkosuhteen määrittämisessä tapahtuvilla virheillä. Männyn ja kuusen albedot olivat systemaattisesti koivun albedoa pienemmät. Tämä selittyy havupuiden selvästi heikommalla transmittanssilla. Latvuston valo-olosuhteiden vaikutus spektriin oli selvempää havupuilla varsinkin VIS- ja NIR-alueilla. Erot adaksiaalisen ja abaksiaalisen puolien välillä näkyvät erityisesti reflektanssissa. Koivulla abaksiaalinen puoli heijasti selvästi voimakkaammin näkyvän valon alueella. Männyllä abaksiaalisen puolen reflektanssi oli heikompia koko mitatun spektrin alueella, mutta erot puolien välillä eivät olleet yhtä selvät kuin koivulla.



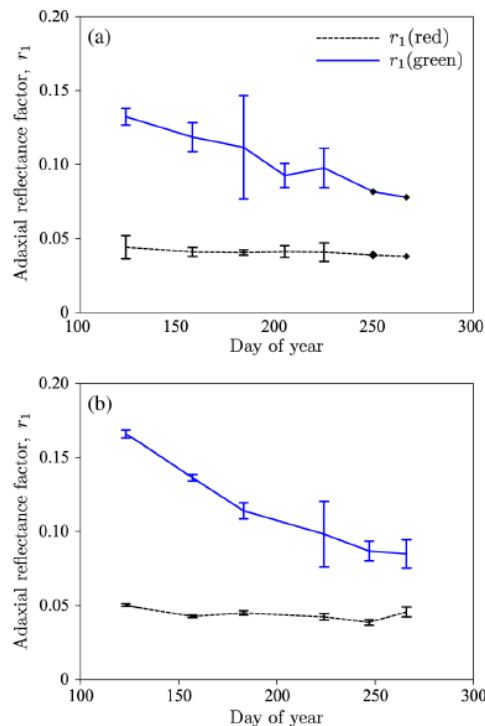
Kuva 8 Heijastuskerroin (DHRF), läpäisykerroin (DHTF) sekä albedo (DHRF + DHTF) männyn adaksiaaliselle puolelle (kuvat a ja b), kuuselle (kuvat c ja d) sekä koivun adaksiaaliselle puolelle (kuvat e ja f) (Lukeš et al. 2013)

Tutkimuksessa (Lukeš et al. 2013) kaikki näytteet kerättiin keskikesällä. Ymmärtääksemme mittausajankohdan vaikutusta kasveihin ja niiden spektreihin, täytyy mittauksia suorittaa läpi kasvukauden. Möttöus et al. (2014) keräsi harmaalepän (*Alnus incana*) ja rauduskoivun (*Betula pendula*) näytteitä huhtikuulta syyskuulle vuonna 2008. Lehdet kerättiin samoista puista ja samankaltaisista valo-olosuhteista läpi tutkimuksen. Reflektanssi ja transmittanssi

mitattiin alueella 400–1050 nm näytteiden molemmilta puolilta. Jos näytteen lasketut  $R$ :n tai  $T$ :n arvot olivat selvästi alle nollan, mittaus poistettiin jatkotutkimuksista. Samoin toimittiin, jos ero adaksiaalisen ja abaksiaalisen puolien välillä olivat mittausepävarmuutta suuremmat.

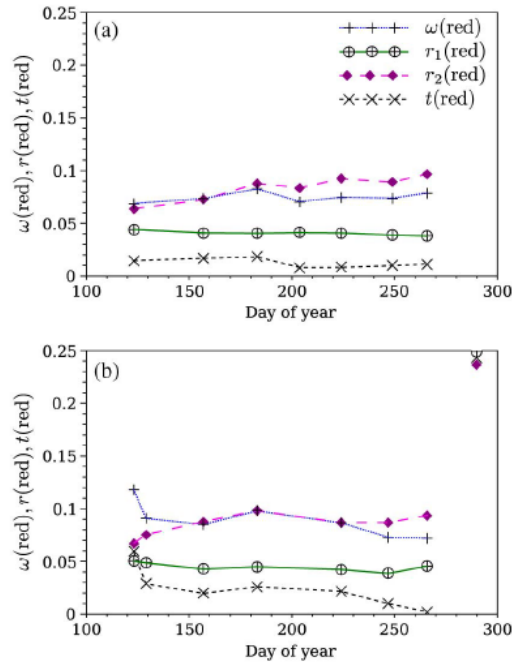
Möttus et al. (2014) esitti neljä suuretta lehtien optisten ominaisuuksien tulkintaan: adaksiaalinen ja abaksiaalinen reflektanssi ( $r_1$ -) ja ( $r_2$ ), lehden keskimääräinen transmittanssi ( $t$ ) ja albedo ( $\omega$ ). Eri puolien transmittanssit keskiarvoistettiin oletuksella, että transmittanssit eivät eroa puolten välillä. Albedo ratkaistiin kaavalla  $\omega(\lambda) = \frac{1}{2}(r_1 + r_2 + t_1 + t_2)$ . Tutkimuksessa haluttiin selvittää erityisesti klorofyllien vaikutusta näkyvän valon spektriin.

Kuvassa 9 on esitetty adaksiaalisen puolen heijastuskerroin vihreän valon heijastusmaksimin ( $\lambda \approx 554$  nm) ja punaisen valon heijastusminimin ( $\lambda \approx 675$  nm) alueilla. Tarkat maksimien ja minimien paikat vaihtelivat hieman lajista ja mittaussajankohdasta riippuen. Vihreän valon heijastus näyttää laskevan läpi kasvukauden molemmilla lajeilla. Muutokset punaisen valon absorptiomaksimissa olivat sen sijaan vähäiset. (Möttus et al. 2014).



Kuva 9 Kasvukauden heijastuskertoimet a) lepälle b) koivulle. Virhepalkit kuvaavat keskihajontoja. Timanttisymbolilla merkityistä ajankohdista saatiin vain yksi laadukas mittaus (Möttus et al. 2014)

Punaisen valon spektrin ajalliset muutokset on esitetty kuvassa 10. Lepän  $r_2$  kasvoi läpi kauden. Samalla  $r_1$  ja  $t$  pysyivät lähes muuttumattomina tai hieman laskivat, jolloin  $\omega$  pysyi melko vakaana läpi kasvukauden. Myös koivun albedo säilyi melko vakaana läpi kauden. Suurin ero lepän ja koivun välillä ilmeni kasvukauden alussa, jolloin koivun albedo oli selvästi leppää suurempi. Molemmilla lajeilla abaksiaalisen puolen reflektanssit olivat systemaattisesti adaksiaalista puolta suuremmat. Myös mittausten hajonta oli pienempää abaksiaalisella puolella. (Möttus et al. 2014)



Kuva 10 Reflektanssien ( $r_1$ ) ja ( $r_2$ ), transmittanssin ( $t$ ) ja albedon ( $\omega$ ) ajalliset vaihtelut punaisen valon absorptiomaksimin alueella a) leppäille b) koivulle (Möttus et al. 2014)

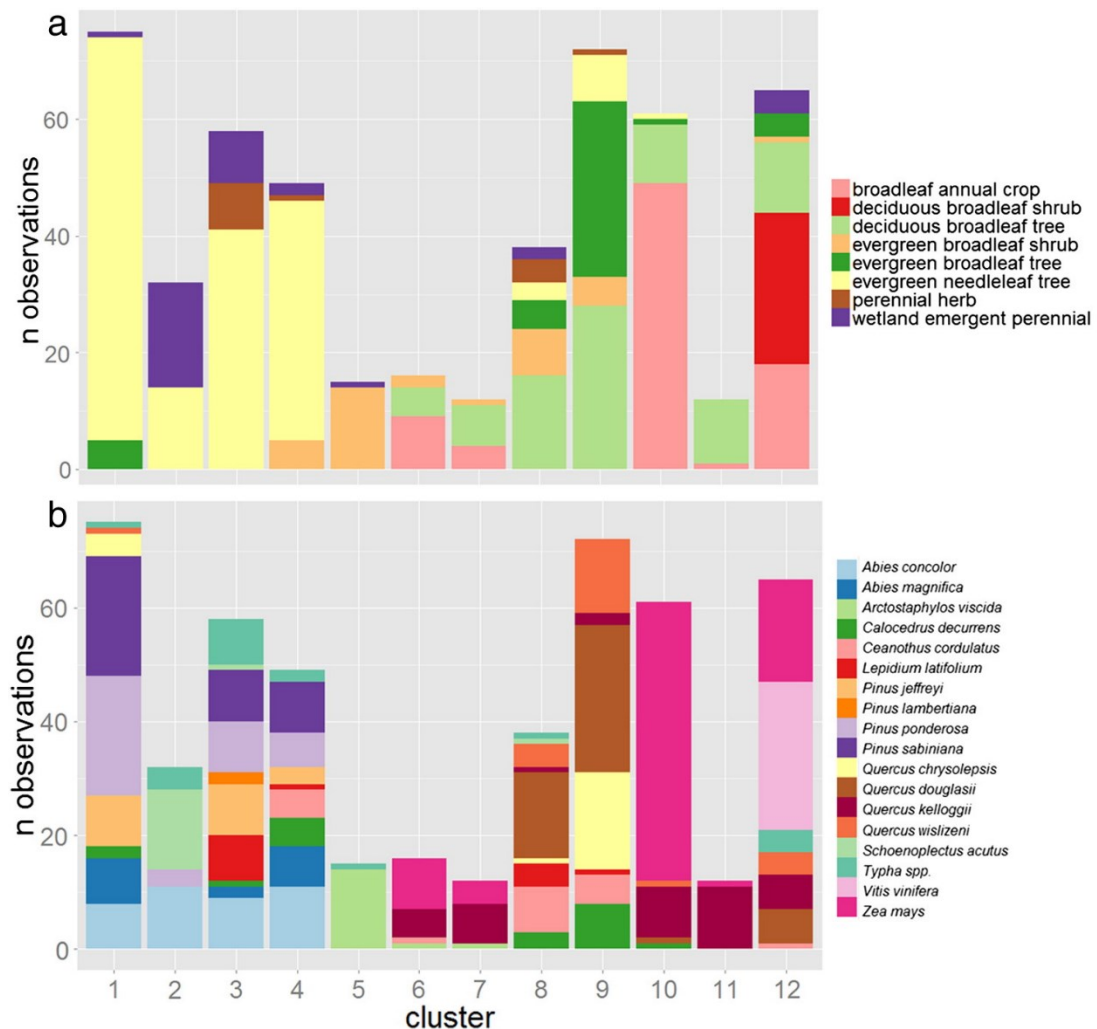
Ymmärtääksemme tarkemmin säteilyn ja kasvillisuuden vuorovaikutusta on syytä tutkia lajien välisiä spektrieroja. Knapp ja Carter (1998) tutkivat 26:tta lauhkean ilmastovyöhykkeen kasvilajia Yhdysvaltojen Mississippissä ja sen lähiympäristössä. Lajit vaihtelivat pensaista puihin ja vesikasveihin. Kaikki lajit olivat lehtipuita yhtä lukuun ottamatta (*Pinus palustris*). Lajit jaoteltiin latvuston valo-olosuhteiden mukaan: runsaalle valolle altistuvat avoimen maaston lajit (14 kpl), puulatvuston alla varjossa kasvava aluskasvillisuus (7 kpl) ja valolle osan vuorokaudesta altistuvat lajit (5 kpl). Spektrimittaukset suoritettiin laboratoriossa Daughtryn et al. (1989) menetelmällä. Jokaista lajia kohden mitattiin viisi näytettä, joiden reflektanssit ja transmittanssit määritettiin näytteen adaksiaaliseen puolelle alueella 400–850 nm. Tutkimusta varten mitattiin myös näytteiden paksuudet ja kuivan massan suhde pinta-alaan.

Kun kaikkien näytteiden spektrejä verrattiin toisiinsa, huomattiin niiden samankaltaisuus. Spektrien keskihajonta oli suurimmillaan alueilla 555 nm ja 712–719 nm, missä klorofyllit absorboivat heikosti. Reflektanssin keskihajonta alueella oli n. 5 %, transmittanssin n. 7 % ja absorptioon n. 8 %. Pienintä hajonta oli lyhimmillä mitatuilla aallonpituuksilla. Myöskään latvuston valo-olosuhteilla tai näytteiden massan ja pinta-alan suhteella ei ollut suurta vaikutusta spektreihin. Koko mitatun spektrin alueella ainoastaan lehden paksuudelta löytyi vahva selitysaste ( $R^2 > 0,5$ ) NIR-alueen heijastus- ja läpäisy-spektreihin. (Knapp et al. 1998)

Roth et al. (2016) tutki kasvispektrien välisiä eroja pääkomponenttianalyysin ja ohjaamattoman luokittelun avulla. Tutkimuksen 18 lajia oli jaettu kahdeksaan kasvityppiin (*Conventional plant functional type, cPFT*) fyysisten, fylogeneettisten ja fenologisten ominaisuuksien perusteella. Lajeihin kuului lehti- ja havupuita erilaisista ekosysteemeistä ympäri Kalifornian osavaltiota. Näytteiden adaksiaaliset reflektanssit alueella 350–2500 nm mitattiin ASD FieldSpec Pro -spektrometrillä laboratorio-olosuhteissa. Neulasmittaukset perustuivat Mersarchin et al. (1999) ja Yáñez-Rausellin et al. (2014) menetelmiin.

Pääkomponenttianalyysin avulla aineisto pyrittiin yksinkertaistamaan irrottamalla siitä keskeisimmät piirteet, jotka kuvaisivat spektrin merkittävimpiä vaihteluita. Pääkomponenttianalyysin ensimmäinen komponentti paljasti suurimman spektrivarianssin tapahtuvan NIR-alueella. NIR-alueen reflektanssiin vaikuttaa lehden sisäinen rakenne ja pinnan ominaisuudet kuten vaha, karheus ja lehtikarvat. Toinen komponentti korreloi erityisesti SWIR-alueen heijastuksen kanssa, mikä on yhteydessä veden ja kuivan aineen määrän sekä näytteen sisäisen rakenteen kanssa. Kolmas komponentti edusti VIS-aluetta ja sillä oli voimakkain yhteys lajieroihin.

Ohjaamattomassa luokittelussa yksinkertaistettu spektriaineisto jaettiin klustereihin ilman a-priori -tietoa lajeista tai kasvityypeistä. Luokittelun tuloksena saatiin 12 optisilta ominaisuuksiltaan selvästi toisistaan eroavaa klusteria. Seuraavaksi tutkittiin, miten lajit ja kasvityypit sijoittuvat muodostuneisiin klustereihin (kuva 11). Pääsääntöisesti sekä kasvityypit että lajit sekoittuvat useisiin eri luokkiin, eikä menetelmä pystynyt luotettavasti erottelemaan näytteitä lajin tai kasvityypin perusteella. Roth et al. (2016) tulivat johtopäätökseen, että kasvien spektrien välisiä eroja ei merkittävästi selitäkään laji- tai tyyppierot, vaan ominaisuudet kuten veden, pigmenttien ja ligniinin pitoisuudet kasvissa. Näihin pitoisuuksiin vaikuttavat esimerkiksi kasvuolosuhteet ja ajankohta, joista löytyikin yhdistäviä piirteitä klustereiden sisältä.



Kuva 11 a) Kasvityyppien (cPFT) sijoittuminen klustereihin b) Lajien sijoittuminen klustereihin (Roth et al. 2016)

## 2 Aineisto

### 2.1 Näytteiden kerääminen

Tutkimuksen aineistona toimivat kesällä 2016 kerätyt lehti- ja neulasnäytteet 25:stä boreaalisen vyöhykkeen puulajista. Näytteet kerättiin pääosin Espoon Otaniemestä (24°48'39'', 60°11'24'') ja Viikin arboretumista, Helsingistä (25°00'30'', 60°13'11''). Lisäksi paperikoivun ja palsamipoppelin näytteet kerättiin Kumpulän kasvitieteellisestä puutarhasta Helsingistä (24°57'19'', 60°12'08'') ja amerikanhaapa Ruotsinkylän tutkimusmetsästä Vantaalta (24°59'15'', 60°21'37''). Mittauskampanjassa kaikki lehtinäytteet, metsälehmusta ja aikaseurattuja lajeja lukuun ottamatta, kerättiin heinäkuussa. Täten mittausajankohdan vaikutus havaittuihin laji- ja sukueroihin voidaan olettaa pieneksi. Neulasnäytteet kerättiin ajanjaksolla 11.7.–12.9.2017. Ajankohdan vaikutus c1-vuosikerran spektreihin lienee pieni, mutta nopeasti kehittyvään c0-vuosikertaan sillä lienee suurempi merkitys. Aikaseurattujen rauduskoivujen ja metsähaapojen näytteet mitattiin seitsemänä eri ajankohtana spektrien kausivaihteluiden selvittämiseksi. Suurta näytemäärää käytettiin ainoastaan mittausajankohdan vaikutuksen tutkimuksessa. Muissa tutkimuksissa kyseisten lajien kohdalla käytettiin vain kesäkuun lopun mittausaineistoa.

Kunkin puulajin näyteoksat leikattiin sekä puun varjoisesta osasta 2–4 metrin korkeudesta että valolle altistuvasta osasta noin kahdeksan metrin korkeudesta. Apuna käytettiin oksaksia ja kahdeksan metrin jatkovartta. Tutkimukseen valittiin vain terveiltä näyttäviä puita ja näytteitä. Oksien leikkaamisen jälkeen varmistettiin, että jokaisesta lehtipuun oksasta löytyi kolme mittauskelpoista lehteä, ja havupuiden oksista tuoreimman vuosikerran (c0) ja edellisen vuoden (c1) terveitä neulasia. Lhotáková et al. (2007) vertailivat metsäkuusen neulasvuosikertojen kemiallisia pitoisuuksia ja heijastusspektrejä. Ainoastaan c0-vuosikerran todettiin eroavan tilastollisesti muista vuosikerroista. Näin rajausta kahden tuoreimman vuosikerran mittaamiseen oli hyväksyttyä diplomityössä. Yhtä havupuunäytettä varten tarvittiin noin 5–20 neulasta. Leikkauksen jälkeen oksat laitettiin välittömästi vesiastioihin ja säilöttiin kylmäpakkausten kanssa kylmälaukkuun. Näytteet pidettiin kylmässä ja pimeässä spektromittauksiin saakka. Maksimiaika keräyksen ja mittauksen välillä oli 12 tuntia.

Jokaista puulajia edusti kaksi puuta, joista molemmista kerättiin kolme näytettä valosta ja kolme varjosta. Poikkeuksina palsamipoppeli, amerikanhaapa, siperianpihta, banksinmänty ja kaikki lehtikuuset, joiden näytteet kerättiin yhdestä puusta. Täten lehtipuita, lehtikuusia ja siperianpihtaa edusti 12 näytettä ja muiden havupuiden kahta vuosikertaa yhteensä 24 näytettä lajia kohden. Siperianlehtikuusesta kerättiin vain varjonäytteitä valolle altistuvan latvuksen ollessa liian korkealla. Palsamipoppelista taas mitattiin vain suoralle valolle altistuvia lehtiä puun paljaasta sijainnista ja pienestä koosta johtuen. Lisäksi aikaseurattuja lajeja edusti kolme puuta kahden sijaan. Lajikohtaiset näytemäärät sekä muita ominaisuuksia on esitetty taulukoissa 2 ja 3. Jokaisesta puusta dokumentoitiin seuraavat tiedot: mittauspäivämäärä, paikkakoordinaatit, pituus Vertex-hypsometrillä mitattuna sekä valokuvat puusta ja leikatuista oksista.

Taulukko 2 Lehtipuiden lajilista

Lajinimi (latin.)	Lajinimi (suom.)	Puiden lkm	Näytteiden lkm	Valo / Varjo	Keräyspaikka	Keräyspäivät
<i>Acer platanoides</i>	Metsävaahtera	2	12	valo & varjo	Otaniemi	8.7.
<i>Alnus glutinosa</i>	Tervaleppä	2	12	valo & varjo	Otaniemi	8.7.
<i>Alnus incana</i>	Harmaaleppä	2	12	valo & varjo	Otaniemi	6.7.
<i>Betula papyrifera</i>	Paperikoivu	2	12	valo & varjo	Kumpula	12.7.
<i>Betula pendula</i>	Rauduskoivu	3	18; 6; 18; 18; 18; 18; 18	valo & varjo	Otaniemi	16.–17.5. & 20.5. & 2.–3.6. & 29.6. & 28.7. & 25.8. & 7.10.
<i>Populus balsamifera</i>	Palsamipoppeli	1	12	valo	Kumpula	12.7.
<i>Populus tremula</i>	Metsähaapa	3	18; 6; 18; 18; 18; 18; 18	valo & varjo	Otaniemi	17.5. & 20.5. & 2.–3.6. & 29.–30.6. & 28.–29.7. & 25.8. & 7.10.
<i>Populus tremuloides</i>	Amerikanhaapa	1	12	valo & varjo	Ruotsinkylä	21.7.
<i>Prunus padus</i>	Tuomi	2	12	valo & varjo	Otaniemi	8.7.
<i>Quercus robur</i>	Tammi	2	12	valo & varjo	Otaniemi	6.7.
<i>Salix caprea</i>	Raita	2	12	valo & varjo	Otaniemi	4.7.
<i>Sorbus aucuparia</i>	Kotipihlaja	2	12	valo & varjo	Otaniemi	6.7.
<i>Tilia cordata</i>	Metsälehmus	2	12	valo & varjo	Otaniemi	24.8.

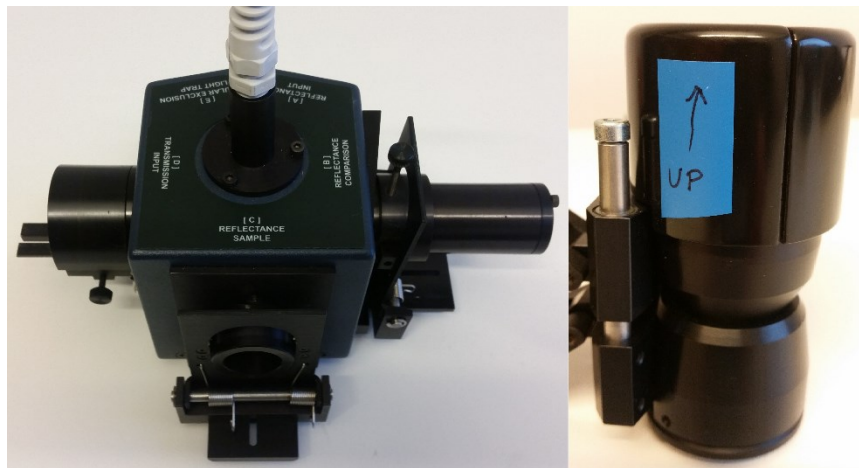
Taulukko 3 Havupuiden lajilista

Lajinimi (latin.)	Lajinimi (suom.)	Puiden lkm	Näytteiden lkm	Valo / Varjo	Keräyspaikka	Keräyspäivät
<i>Abies balsamea</i>	Palsamipihta	2	24	valo & varjo	Viikki	20.7. & 17.8.
<i>Abies sibirica</i>	Siperianpihta	1	12	valo & varjo	Viikki	23.–24.8.
<i>Larix gmelinii</i>	Dahurianlehtikuusi	1	12	valo & varjo	Viikki	4.8.
<i>Larix laricina</i>	Kanadanlehtikuusi	1	12	valo & varjo	Viikki	22.8.
<i>Larix sibirica</i>	Siperianlehtikuusi	1	12	varjo	Viikki	3.8.
<i>Picea abies</i>	Metsäkuusi	2	24; 24	valo & varjo	Otaniemi	14.6 & 20.–21.6. & 23.6. & 12.–13.9.
<i>Picea glauca</i>	Valkokuusi	2	24	valo & varjo	Viikki	30.8.
<i>Picea mariana</i>	Mustakuusi	2	24	valo & varjo	Viikki	18.–19.8.
<i>Pinus banksiana</i>	Banksinmänty	1	24	valo & varjo	Viikki	19.8. & 24.8.
<i>Pinus contorta</i>	Kontortamänty	2	24	valo & varjo	Viikki	18.7 & 18.8.
<i>Pinus sylvestris</i>	Metsämänty	2	24;24	valo & varjo	Otaniemi	17.6. & 20.6. & 22.6. & 12.–14.9.
<i>Pseudotsuga menziesii</i>	Douglaskuusi	2	24	valo & varjo	Viikki	11.7. & 16.8.

## 2.2 Laitteisto

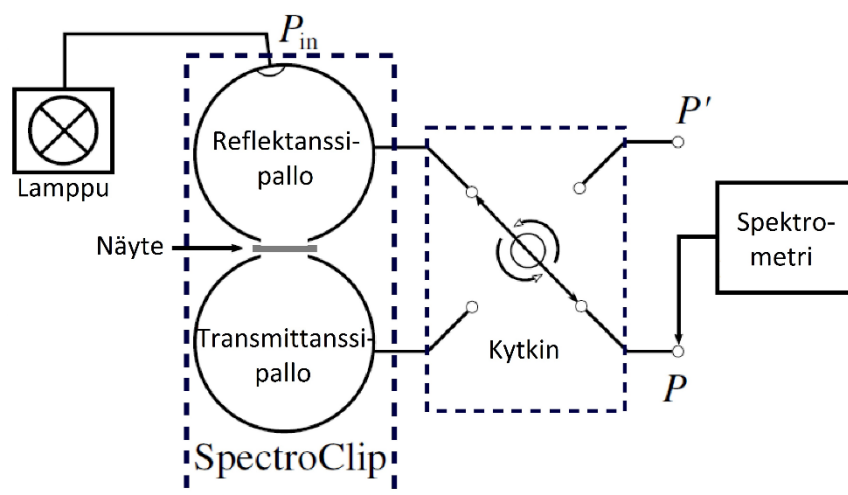
Spektrimittaukset suoritettiin Aalto-yliopiston tiloissa Otaniemessä. Spektrometrinä mitauksissa käytettiin PANalytical Companyn valmistamaa ASD FieldSpec® 4 Standard-Res -kenttäspektrometria, joka kattaa aallonpituudet 350–2500 nm (ASD-manuaali). Laitteen spektraalinen resoluutio on 3 nm alueella 350–1000 nm, ja 10 nm alueella 1000–2500 nm ja se tallentaa spektrin 1,4 nm (VIS ja NIR) tai 2 nm (SWIR) välein. Interpoloimalla vierekkäisten kanavien mittauksia, laite tulostaa lopullisen spektrin yhden nanometrin tarkkuudella.

Havupuiden neulasten mitauksissa DHRF:n ja DHTF:n määrittämiin käytettiin yksittäistä integroivaa palloa aikaisemmin esitetyjen tutkimusten (Daughtry et al. 1989, Mesarch et al. 1999, Lukeš et al. 2013, Möttus et al. 2014) tapaan. Pallona toimi ASD RTS-3ZC, joka yhdistettiin optisella kuidulla spektrometriin. Valonlähteenä käytettiin 10 W ASD CL-10 -halogeenilamppua. Näytetelineet koostuivat kahdesta metallilevystä, jotka päällystettiin absorboivalla maalilla. Asetelmaan kuului myös portin ulkopuolelle asetettu fotoniansa, joka absorboi voimakkaasti estäen läpäisykomponentin heijastumisen takaisin palloon.



*Kuva 12 Vasemmalla ASD:n integroiva pallo, oikealla SpectroClip*

Lehtimittaukset suoritettiin Ocean Opticsin valmistamalla SpectroClip TR -kaksoispallolla. Valonlähteenä toimi saman valmistajan HL-2000-FHSA 20 W halogeenilamppu. SpectroClip yhdistettiin spektrometriin optisella kuidulla ja erillisellä kytkinmoduulilla (Ocean Optics FOS-2X2-TTL), joka mahdollisti nopean vaihdon reflektanssi- ja transmittanssimittauksen välillä. Vastaavasti kuidun paikkaa kytkinmoduulin sisääntulossa vaihdeltiin mittauksen välissä. Kuidun irrottamisen vaikutusta testattiin ottamalla useita mittauksia tyhjästä pallosta, irrottamalla kuitu aina mittauksen välissä. Tällä ei ollut vaikutusta mittauksien tuloksiin. SpectroClip sekä RTS-3ZC integroiva pallo on esitetty kuvassa 12. SpectroClipin kytkentäkaavio on esitetty kuvassa 13.



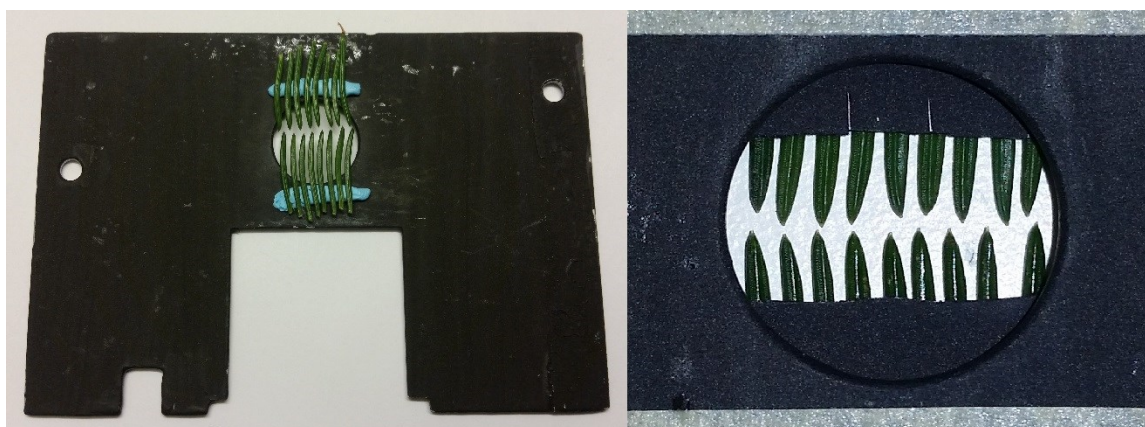
Kuva 13 Spectroclipin kytkentäkaavio

Kaikkia mittauksia kontrolloitiin ASD RS<sup>3</sup> -ohjelmalla kannettavalta tietokoneelta, johon spektrometrilla oli langaton yhteys. Mittausten jälkeen kaikki näytteet skannattiin Epson Perfection V550 Photo –skannerilla näytteen pinta-alojen määrittämiseksi. Neulasnäytteet skannattiin näytetelineessään myöhempää aukkosuhteen laskentaa varten.

## 2.3 Laboratoriomittaukset

### 2.3.1 Valmistelut

Spektrometri ja valonlähde käynnistettiin vähintään puoli tuntia ennen mittausten aloittamista laitteiden lämpötilojen vakauttamiseksi. Näyteoksat nostettiin kylmälaukusta ainoastaan lehtien tai neulasten irrottamisen ajaksi. Lehtinäytteet mitattiin välittömästi irrotuksen jälkeen, kun taas neulasnäytteet aseteltiin pinsettien ja sinitarran avulla näytetelineeseen ennen mittausta (kuva 14). Neulaset aseteltiin, koosta riippuen, yhdeksi tai kahdeksi 5–10 neulasen riviksi. Erityisen lyhyille mustakuusen neulasille rakennettiin erilliset jatkotuet telineeseen. Ilman jatkotukia neulaset eivät yltäneet aukon reunalta aukon keskelle, johon valo keila oli kohdistettu. Neulasten asettelu vei aikaa, lajista riippuen, noin 2–8 minuuttia. Kaikki mittausta edeltävät toimenpiteet pyrittiin suorittamaan mahdollisimman nopeasti kasvin fysiologisten muutosten välttämiseksi.



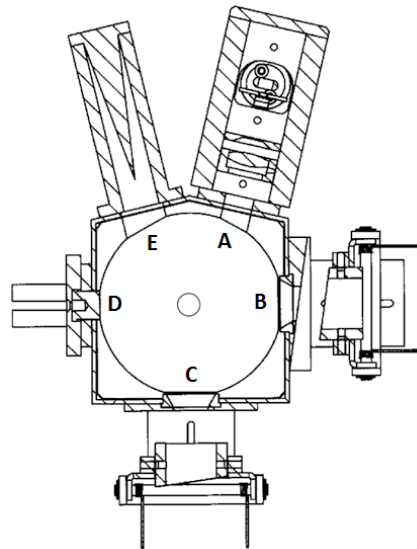
Kuva 14 Vasemmalla neulaset aseteltuina näytetelineeseen, oikealla neulaset jatkotelineissään

## 2.3.2 Havupuumittaukset

Havupuiden neulasnäytteet mitattiin yksittäisellä integroivalla pallolla. Referenssikohteena käytettiin valkoista Spectralon®-heijastinta, jonka heijastuskerroin on yli 95 % koko mitatun spektrin alueella (Labsphere-manuaali). Kohinan minimoimiseksi jokaisen näytteen heijastus- ja läpäisyarvo laskettiin 30:n 1,09 s kestäneen peräkkäisen mittauksen keskiarvona. Peräkkäisten mittausten lukumäärällä ja integrointiajalla varmistettiin laadukas mittaus kokonaisajan pysyessä kohtuullisena. Neulasten asettelun jälkeen yhden näytteen mittaus kesti noin 15 minuuttia. Mittausprotokolla ja porttien paikat on esitetty taulukossa 4 ja kuvassa 15. Adaksiaalisten ja abaksiaalisten puolien visuaalisen samankaltaisuuden takia kaikki *Picea*-suvun ja kanadanlehtikuusen näytteet mitattiin vain yhdeltä puolelta.

*Taulukko 4 ASD RTS-3ZC -pallon mittausprotokolla, S = näyte, RS = referenssinäyte, WR = valkoinen referenssikohde, C = näyteteline, Ansa = fotoniansa*

Vaihe	Toimenpide	Portti A	Portti B	Portti C	Portti D	Portti E
1	<b>Optimointi</b>					
2	<b>R, Referenssimittaus</b>	Lamppu	RS+C+Ansa	WR+C	Suljettu	Suljettu
3	<b>R, adaksiaalinen</b>	Lamppu	WR+C	S+C+Ansa	Suljettu	Suljettu
4	<b>R, abaksiaalinen</b>	Lamppu	WR+C	S+C+Ansa	Suljettu	Suljettu
5	<b>R, hajavalo</b>	Lamppu	WR+C	C+Ansa	Suljettu	Suljettu
6	<b>T, Referenssimittaus</b>	Suljettu	WR	S+C+Ansa	Lamppu+C	Suljettu
7	<b>T, adaksiaalinen</b>	Suljettu	WR	C+Ansa	Lamppu+S+C	Suljettu
8	<b>T, abaksiaalinen</b>	Suljettu	WR	C+Ansa	Lamppu+S+C	Suljettu
9	<b>T, hajavalo</b>	Suljettu	C+Ansa	WR	Lamppu+C	Suljettu
10	<b>Pimeävirta</b>	Irrota kuitu integroivasta pallosta ja sulje kuidun pää tulpalla				



*Kuva 15 Porttien paikat ASD RTS-3ZC -pallossa (muokattu valmistajan kuvituksesta)*

### 2.3.3 Lehtipuumittaukset

Lehtipuiden näytteet mitattiin kaksoispallomenetelmällä (Pickering et al. 1992, Möttus et al. 2017). Asetelmassa valokeila kohdistettiin 8°:n kulmassa kohti näytettä, ja vastaanotettiin anisotrooppisella 25°:n näkökentällä. Kalibrointi suoritettiin mittaamalla Spectralonin ( $\rho \geq 95\%$ ) ja tyhjän näyteportin heijastukset. Valonlähteen sijainnista johtuen valkoisen heijastusreferenssin käyttö oli mahdotonta transmittanssimittaukselle, jolle määritettiin vain tyhjän portin läpäisy. Hajavalokorjausta varten mitattiin tummaa diffuusia heijastinta (Avian Technologies,  $\rho = 2\%$ ). Pimeän virran mittauksen ajaksi vastaanotin suljettiin kytkimellä.

Jokaisen näytteen ja referenssin spektri keskiarvoistettiin 30:stä peräkkäisestä 544 ms kestäneestä mittauksesta. Referenssimittaukset suoritettiin kolmen näytteen välein. Näytteet pyrittiin asettelemaan siten, etteivät lehtisuonet tai mahdolliset vauriot ja epäpuhtaudet peittäisi SpectroClipin näyteporttia. Yhden näytteen kokonaismittausaika, mukaan lukien referenssimittaukset, oli noin 5 min. Kampanjassa käytetty mittausprotokolla on esitetty taulukossa 5.

Taulukko 5 SpectroClipin mittausprotokolla

Vaihe	Toimenpide	Mittauskohde, mitattava ylöspäin	puoli	Kytkimen asento ja kuidun paikka	Kommentit
1	Optimointi	Tyhjä		R	
2	R, Referenssimittaus	Spectralon, valkoinen		R	
3	Pimeävirta	Tyhjä		Pois päältä	
4	Hajavallo	Spectralon, musta		R	
5	R, Referenssimittaus	Tyhjä		R	
6	T, Referenssimittaus	Tyhjä		T	
7	R, adaksiaalinen	Adaksiaalinen puoli		R	
8	T, adaksiaalinen	Adaksiaalinen puoli		T	<b>NÄYTE 1</b>
9	R, abaksiaalinen	Abaksiaalinen puoli		R	
10	T, abaksiaalinen	Abaksiaalinen puoli		T	
7	R, adaksiaalinen	Adaksiaalinen puoli		R	
8	T, adaksiaalinen	Adaksiaalinen puoli		T	<b>NÄYTE 2</b>
9	R, abaksiaalinen	Abaksiaalinen puoli		R	
10	T, abaksiaalinen	Abaksiaalinen puoli		T	
7	R, adaksiaalinen	Adaksiaalinen puoli		R	
8	T, adaksiaalinen	Adaksiaalinen puoli		T	<b>NÄYTE 3</b>
9	R, abaksiaalinen	Abaksiaalinen puoli		R	
10	T, abaksiaalinen	Abaksiaalinen puoli		T	

## 3 Menetelmät

### 3.1 Aineiston esiprosessointi

#### 3.1.1 Lehtipuumittaukset

Laboratoriomittausten jälkeen näyte- ja referenssimittauksista laskettiin heijastus- ja läpäisykertoimet Möttus et al. (2017) esittämällä tavalla. Menetelmä perustuu Pickeringin et al. (1992) julkaisemiin yhtälöihin (kaavat 8, 9 ja 10), jotka kuvaavat vastaanotettua tehoa kaksoisintegroivassa pallossa näytteen reflektanssin ja transmittanssin sekä pallon ominaisuuksien funktiona. Möttus et al. (2017) menetelmässä heijastus- ja läpäisykertoimet ratkaistaan yhtälöryhmää iteroimalla, jolloin kaikkia pallon ominaisuuksia ei tarvitse tietää. Heijastuskertoimen ( $R$ ) ensimmäinen estimaatti ratkaistiin kaavalla:

$$R = \frac{\rho_0^{\Sigma} Q_R + 1 - \sqrt{(\rho_0 - \rho_0')^2 Q_R^2 + 2\rho_0^{\Sigma} Q_R + 1}}{2\rho_0 \rho_0' Q_R}, \quad (11)$$

missä

$$\begin{aligned} \rho_0 &= \frac{s}{V_0}, \\ V_0 &= 1 - (m\alpha + rh), \\ \rho_0^{\Sigma} &= \rho_0 + \rho_0', \\ Q_R &= \frac{P}{P_{SPC} 1 - R_{SPC} \rho_0}. \end{aligned}$$

Heittomerkki viittaa transmittanssimittaukseen ja SPC referenssimittaukseen. Reflektanssi- ja transmittanssipallojen ominaisuuksia kuvaavat pallon vakiot ( $\rho_0, \rho_0'$ ) ratkaistiin referenssimittauksista ( $P(0), P'(0), P_{SPC}$ ) eli spektrometrin tallentamista lukemista mitattaessa tyhjää reflektanssi- ja transmittanssipalloa sekä valkoista Spectralonia. Tällöin yllä esitettyä pallon ominaisuuksiin perustuvaa kaavaa ei tarvittu. Läpäisykertoimen  $T$  ensimmäinen estimaatti ratkaistiin sijoittamalla  $R$ :n estimaatti kaavaan:

$$T = \frac{\rho_0 \rho_0' - 1 + \sqrt{4(1 - R\rho_0)(1 - R\rho_0')\rho_0 \rho_0' Q_T^2 + (1 - \rho_0 \rho_0')^2}}{2\rho_0 \rho_0' Q_T}, \quad (12)$$

missä  $Q_T$  on transmittanssimittauksen ja referenssimittauksen (tyhjä näyteportti) suhde ( $P'/P'(0)$ ). Seuraavaksi  $T$ :n ensimmäinen estimaatti sijoitettiin kaavaan

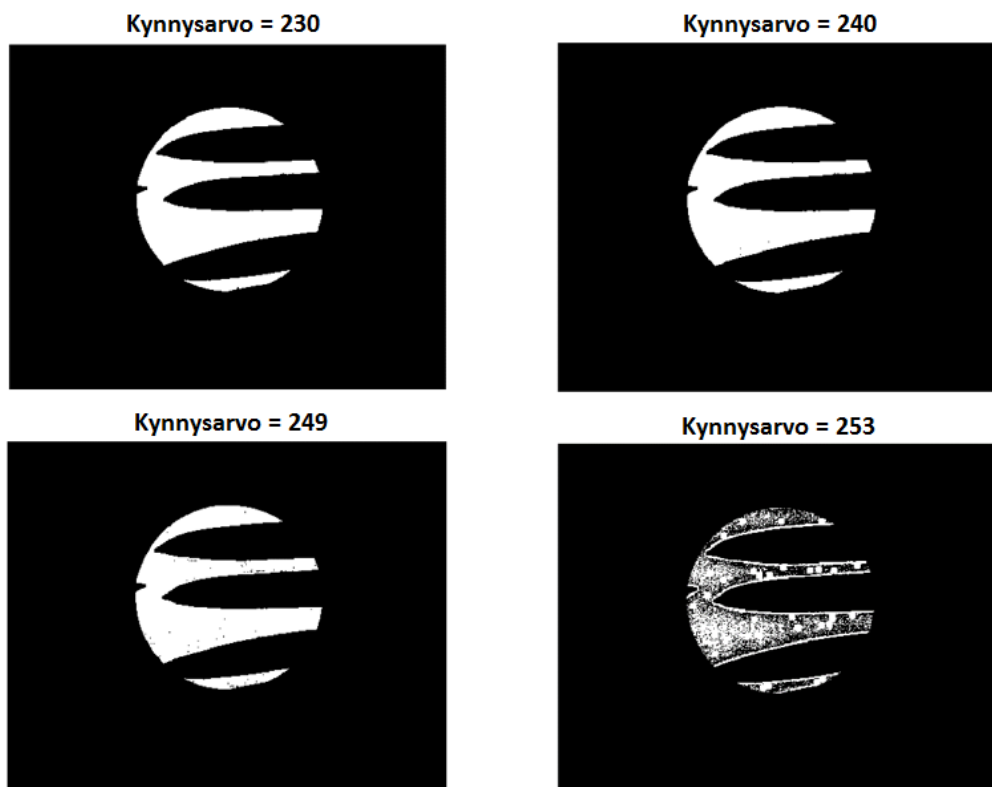
$$R = \frac{\rho_0^{\Sigma} Q_R + 1 - \sqrt{4\rho_0'^2 (\rho_0 Q_R + 1)^2 T^2 + [(\rho_0 - \rho_0') Q_R + 1]^2}}{2\rho_0' (\rho_0 Q_R + 1)} \quad (13)$$

Heijastuskertoimet  $R$  ja  $T$  ratkaistiin iteroimalla kaavoja (12) ja (13). Kolmen iterointikierroksen jälkeen arvot vakiintuivat. Kaavojen (11), (12) ja (13) johtaminen ja tarkempi laskenta ovat esitetty tutkimuksessa (Möttus et al. 2017). Ennen laskentoja kaikista spektrometrin tallentamista lukemista vähennettiin pimeä virta. Reflektanssipallossa tehdyistä mittauksista vähennettiin lisäksi myös hajavalon osuus. Hajavalokorjauksen laskeminen tumman diffuusin heijastajan avulla on kuvattu Möttus et al. (2017) artikkelissa.

### 3.1.2 Havupuumittaukset

Neulasnäytteiden spektrien laskemiseksi skannerikuvilta määritettiin näytteen aukkosuhde GIMP-kuvankäsittelyohjelmalla. Tätä varten suunniteltiin digitaaliset kuvamaskit, jotka rajoittivat näyteportilta alueen, johon valokeila osuu mittaustilanteessa. Tarvittiin yhteensä neljä maskia mallintamaan näytteen molemminpuolisia reflektanssi- ja transmittanssimittauksia. Maskit aseteltiin manuaalisesti skannerikuvan päälle, ja kuvatiedostot tallennettiin tiff-muotoon kovalevyille.

Neulasten ja taustan erottamiseksi toisistaan 8-bittisten harmaasävykuvien kynnyksiarvoksi valittiin 240, koska sitä korkeammilla kynnyksiarvoilla osa kohinaisesta taustasta tulkittiin kohteeksi. Seuraavaksi kokeiltiin eri skannausresoluutioita ja todettiin 800 dpi:n (pistettä tuumaa kohden) olevan riittävä resoluutio. Tätä karkeampi resoluutio aliarvioi aukkoisuutta, koska reunapikselit, jotka sisälsivät sekä näytteen että taustan, tulkittiin näyteeksi (kuva 16). Resoluution edelleen kasvattaminen taas lisäsi mittausaikaa, lasketun aukkosuhteen muuttumatta. Kun aukkosuhde oli ratkaistu, heijastus- ja läpäisykertoimet laskettiin kaavojen (6) ja (7) mukaisesti. Laskennassa huomioitiin lisäksi pimeä virran vaikutus, joka vähennettiin muista mittauksista.



*Kuva 16 Kynnyksarvon vaikutus näytteen ja taustan luokittelussa*

## 3.2 Suodatus

Lopullisten heijastus- ja läpäisykertoimien ratkaisemiseksi kaikki mitatut spektrit suodatettiin Savitzky-Golay -suodattimella (Savitzky ja Golay 1964). Menetelmä soveltuu hyvin hyperspektraalisen aineiston suodattamiseen, sillä se suodattaa tehokkaasti kohinaa säilyttäen suuren osan spektrin informatiivisista yksityiskohdista (Ruffin ja King 1999). Sitä on käytetty myös kasvien spektritutkimuksissa (Cho ja Skidmore 2006, Rautiainen et al. 2011, Roth et al. 2016). Savitzky-Golay -suodatuksessa spektrin jokaiseen pisteeseen ja sen vieruspisteisiin sovitetaan moniasteinen polynomi pienimmän neliösumman menetelmällä. Parametreina ovat vieruspisteiden lukumäärä eli ikkunakoko ja sovitettavan polynomin aste.

Diplomityössä kokeiltiin järjestelmällisesti eri suodatusparametrien arvoja ja pyrittiin löytämään optimaaliset arvot vertailemalla suodatettuja spektrejä visuaalisesti. Polynomin asteeksi valittiin 2. Ikkunakokona käytettiin kahta lukuarvoa: 15 nm alueelle 350–1000 nm ja 39 nm tätä pidemmille aallonpituuksille. Lisäksi lehtipuiden spektreistä leikattiin kohinaisimmat osat pois rajaamalla lopullinen alue 400–2300 nm:iin. Erittäin kohinaiset osat (lehtipuiden spektrit 400–450 nm ja 2100–2300 nm sekä havupuiden spektrit 2300–2500 nm) suodatettiin Matlabin verhoikäyräsovituksella *envelope*. Siinä signaalille interpoloidaan paikalliset minimi- ja maksimit  $n$ -kokoisella ikkunalla. Suodatettu signaali ratkaistaan laskettujen minimien ja maksimien keskiarvoista. Diplomityössä verhoikäyräsovitus suoritettiin ikkunakoon arvoilla  $n = [20, 25, 30, 35, 40]$ . Lopullinen suodatettu spektri ratkaistiin kaikkien ikkunakokojen avulla muodostettujen käyrien keskiarvona.

## 3.3 Punaisen reunan käännepisteen määrittäminen

Punaisen reunan käännepisteen ratkaisemiseksi suodatetuista heijastus-, läpäisy- ja albedospektreistä laskettiin käännepisteen (REIP) arvot käyttäen kahta eri menetelmää. Kahden eri menetelmän käytöllä vahvistettiin tulosten luotettavuutta. Ensimmäinen menetelmä (*REIP1*) perustui derivaattaspektrin maksimiin ja toinen (*REIP2*) lineaariseen neljän pisteen menetelmään (Cho ja Skidmore 2006). Jälkimmäisessä käännepisteen sijainti lasketaan neljän kiinnitetyn aallonpituuden ( $\lambda_{670}$ ,  $\lambda_{700}$ ,  $\lambda_{740}$  ja  $\lambda_{780}$ ) avulla seuraavasti:

$$REIP2 = 700 + 40 \frac{\lambda_{670} + \lambda_{780} - \lambda_{700}}{\lambda_{740} - \lambda_{700}} \quad (14)$$

## 3.4 Tilastolliset menetelmät

Ennen koko aineiston järjestelmällistä tarkastelua mittausten onnistuneisuus tarkistettiin visuaalisesti. Kaikkien näytteiden heijastus- ja läpäisy-spektrien piirteet olivat kasvillisuudelle tyypilliset. Karkeat mittausvirheet paljastuivat yleensä jo mittausten aikana, jolloin tarvittava uudelleenmittaus oli helppo toteuttaa.

Aineiston tarkastelu aloitettiin vertailemalla keskiarvospektrejä. Tämä antoi nopean kuvan erojen suuruusluokasta ja suunnasta. Mielenkiinnon kohteena tutkimuksessa olivat puulajien ja -sukujen sekä yleisesti lehti- ja havupuiden väliset eroavaisuudet. Tämän lisäksi tarkasteltiin eroja adaksiaalisessa ja abaksiaalisessa puolessa, latvuston valo-olosuhteissa, kasvukauden vaiheessa ja neulasten vuosikerrassa. Tilastollinen aallonpituuskohtainen tutkimus toteutettiin yksisuuntaisella varianssianalyysillä sekä tutkimalla aallonpituuksien välisiä korrelaatioita. Varianssianalyysin tarkoituksena oli selvittää kvantitatiivisesti, miten paljon kukin tekijä selitti spektrien vaihtelusta. Kanavien väliset korrelaatiot kertovat, mitkä aallon-

pituudet käyttäytyvät keskenään samankaltaisesti. Sisäisesti korreloivien ryhmien lukumäärä ja sijainnit spektrissä voivat auttaa kaukokartoitusinstrumenttien kanavapaikkojen ja -leveyksien suunnittelussa.

Varianssianalyysissa luokkien sisäistä varianssia vertaillaan aineiston kokonaisvarianssiin. Selittävinä muuttujina olivat puulaji, puusuku, latvuston valo-olosuhteet, lehden tai neulasen puoli ja havupuilla neulasvuosikerta. Yksisuuntaisessa varianssianalyysissa vertailu tehdään yksi muuttuja kerrallaan. Vastemuuttujina olivat spektrin ( $R$ ,  $T$  ja  $\omega$ ) arvot eri aallonpituuksilla sekä reflektanssista, transmittanssista ja albedosta lasketut REIP:n sijainnit. Tulosta voi tarkastella selityksasteen  $R^2$  ja  $p$ -arvon avulla. Selityksaste kertoo, kuinka suuren osan muuttuja, kuten laji tai latvuston valo-olosuhde, selittää aineiston varianssista. Suuri selityksaste kertoo muuttujan olevan merkittävä hajontaan vaikuttava tekijä. Diplomityössä  $R^2$  ratkaistiin varianssianalyysin tuloksena saaduista neliösummista:

$$R^2 = 1 - \frac{SSE}{SST} = 1 - \frac{\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2}{\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2}, \quad (15)$$

missä  $SSE$  on residuaalineliosumma (*sum of squared errors*),  $SST$  on kokonaisneliosumma (*total sum of squares*),  $y_{ij}$  on vastemuuttujan arvo luokan  $j$  havainnolle  $i$ ,  $\bar{y}_{.j}$  on vastemuuttujan luokkakeskiarvo ja  $\bar{y}_{..}$  on aineiston kokonaiskeskiarvo.

$p$ -arvo luettiin F-jakaumasta, joka ratkaistiin kaavalla:

$$F = \frac{\frac{SSR}{k-1}}{\frac{SSE}{N-k}} = \frac{\frac{\sum_j n_j (\bar{y}_{.j} - \bar{y}_{..})^2}{k-1}}{\frac{\sum_i \sum_j (y_{ij} - \bar{y}_{.j})^2}{N-k}}, \quad (16)$$

missä  $SSR$  on mallin selittämien poikkeamien neliöiden summaa (*sum of squared regression*),  $k$  on selittävien muuttujien lukumäärä ja  $N$  on havaintojen lukumäärä.

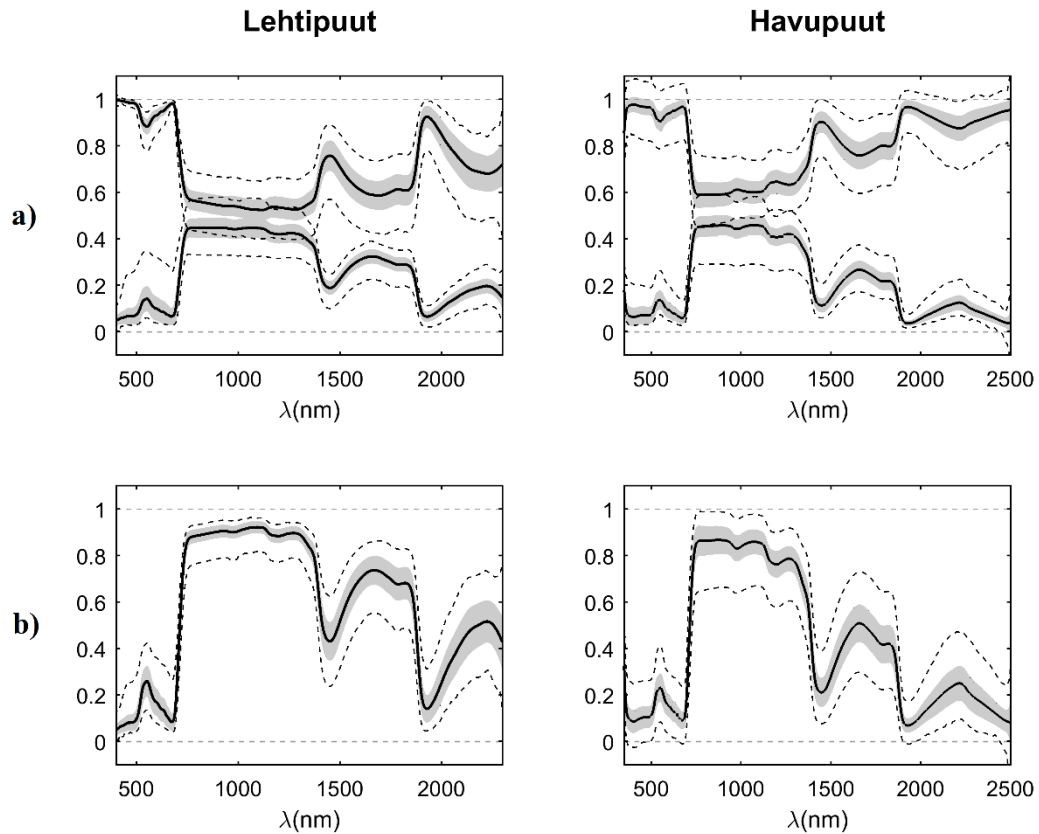
Pieni  $p$ -arvo viittaa tuloksen merkitsevyyteen: varianssi ei selity pelkällä satunnaisvirheiden aiheuttamalla hajonnalla. Merkitsevyytensä diplomityössä pidettiin  $p$ :n arvoa 0,05. Varianssianalyysi suoritettiin spektriaineiston lisäksi myös REIP-arvoille. Aineiston tilastollinen tarkastelu toteutettiin Matlabilla, versio R2016a. Analyysi tehtiin erikseen havupuille ja lehtipuille, koska mittausmenetelmät olivat erilaiset, eivätkä mitatut spektrit siksi täysin vertailukelpoisia.

## 4 Tulokset ja niiden tarkastelu

### 4.1 Spektrien yleispiirteitä

Mitatut lehti- ja havupuuspektrit olivat piirteiltään tyypillisiä kasvillisuuspektrejä: reflektanssi ja transmittanssi olivat matalat näkyvän valon alueella ja korkeat NIR-alueella. SWIR-alueella absorptio kasvoi aallonpituuden kasvaessa, ja spektreistä pystyi selvästi erottamaan veden absorptiokaistat aallonpituuksilla 1450 nm ja 1950 nm (kuva 17). Lehtipuilla reflektanssin keskiarvo vaihteli välillä 0,05–0,45, transmittanssin keskiarvo välillä 0,00–0,48 ja albedon keskiarvo välillä 0,05–0,92. Vaihteluväli havupuiden reflektanssille oli 0,04–0,46, transmittanssille 0,02–0,41 ja albedolle 0,07–0,87. Molempien puutyypin suurimmat  $R:n$ ,  $T:n$  ja siten myös  $\omega:n$  arvot mitattiin NIR-alueelta. Suurimmat erot puutyypin albedojen keskihajonnoissa havaittiin NIR-alueella, missä lehtipuiden hajonta oli selvästi havupuita pienempää, vaikka molempien puutyypin  $R$ - ja  $T$ -spektrien keskihajonnat olivat samaa suuruusluokkaa. Huomattavaa oli myös havupuiden voimakas heijastus ja läpäisy aivan mittausspekttrin alkupäässä. Lehtipuiden esiprosessoimattomista, 350 nm:n ulottuvista spektreistä ilmiötä ei havaittu.

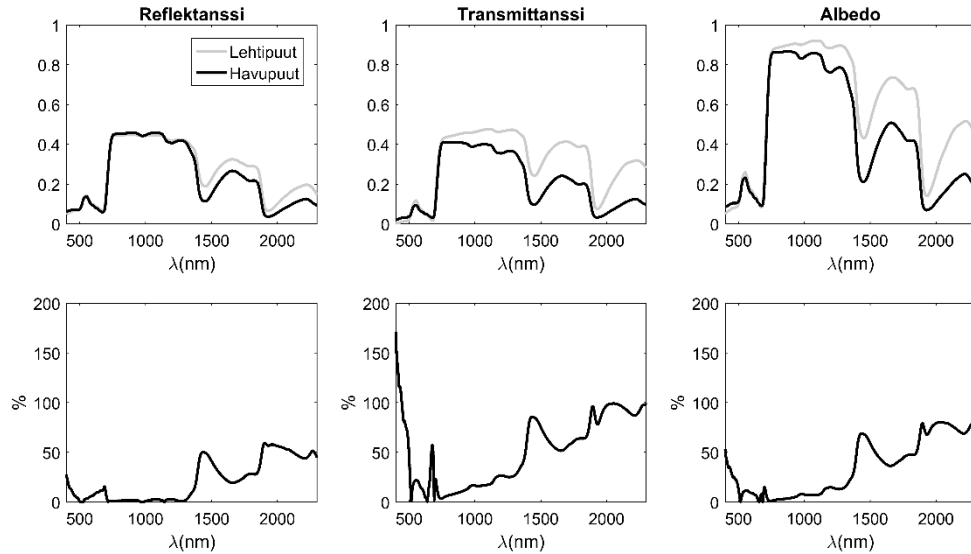
Lehti- ja havupuiden heijastus-, läpäisy ja albedospektrejä verrattiin toisiinsa (kuva 18). NIR- ja SWIR-alueilla lehtipuiden albedo oli havupuita suurempi, prosentuaalisen eron ollessa suurimmillaan 80 % aallonpituudella 2050 nm. Albedoeroja selittivät erityisesti erot  $T:n$  arvoissa NIR- ja SWIR-alueilla. Reflektanssit erosivat voimakkaimmin SWIR-alueella. Erot NIR-alueen reflektansseissa olivat taas hyvin pieniä: alle 5 % alueella 705–1325 nm. Näkyvän valon alueella, suurimmat erot esiintyivät mittausspekttrin alkupäässä sekä punaisen valon absorptiomaksimissa. Erot korostuivat transmittanssispektreissä, joissa havupuun arvot olivat selvästi lehtipuumittauksia suurempia.



Kuva 17 Keskiarvospektrit, keskihajonnat sekä minimi- ja maksimiarvot a) reflektanssille ja transmianssille b) albedolle

Tulokset ovat yhdensuuntaiset Lukešin et al. (2013) tutkimuksen kanssa, missä käsiteltiin eroja koivun, kuusen ja männyn spektreissä. Kyseisessä tutkimuksessa koivun albedo nousi suurimmillaan 0,95:een NIR-alueella, havupuiden albedon jäädessä hieman matalammaksi. Tutkimuksessa oli myös havaittu lehtipuiden pienempi keskihajonta NIR-alueella. Suuri keskihajonta  $R$ - ja  $T$ -spektrien NIR-alueella, mutta vastaava heikko erottuminen albedoissa, on tunnettu ilmiö kasvien spektrometriassa. NIR-alueen reflektanssi ja transmianssi ovat negatiivisesti korreloituneet, mitä selittävät pääasiassa lehden paksuuserot (Gausman et al. 1969, Knapp ja Carter 1998, Demarez et al. 1999). Heijastus kasvaa lehden paksuuden kasvaessa ja vastaavasti läpäisy heikkenee. Paksuuden vaikutus albedoon on täten pieni. Ilmiö korostuu NIR-alueella, missä lehden rakenteen vaikutus on suuri. Havupuilla  $R$ - ja  $T$ -spektrien negatiivinen korrelaatio oli matalampaa, mitä voi selittää suuremmat rakenne-erot eri lajien välillä.

Lehti- ja havupuuvvertailuja tehdessä on huomioitava eri mittausmenetelmistä johtuvat eroavaisuudet, joita voi olla vaikea määrittellä tarkasti. On kuitenkin oletettavaa, että havupuumittausten aukkosuhteen määrittämisessä tapahtuvat virheet kasvattavat havaintojen keskihajontaa lehtipuumittauksia suuremmaksi. Pienillä  $R$ :n ja  $T$ :n arvoilla aukkosuhde vaikuttaa transmianssiin enemmän kuin reflektanssiin (kaavat 6 ja 7). Ilmiö saattaa selittää suuret erot lehti- ja havupuumittausten välillä transmianssispektrin alkupäässä ja punaisen valon absorptiomaksimissa.



Kuva 18 Yllä lehti- ja havupuunäytteiden keskiarvospektrit sekä alla lehtien ja neulasten prosentuaalinen ero (itseisarvo)

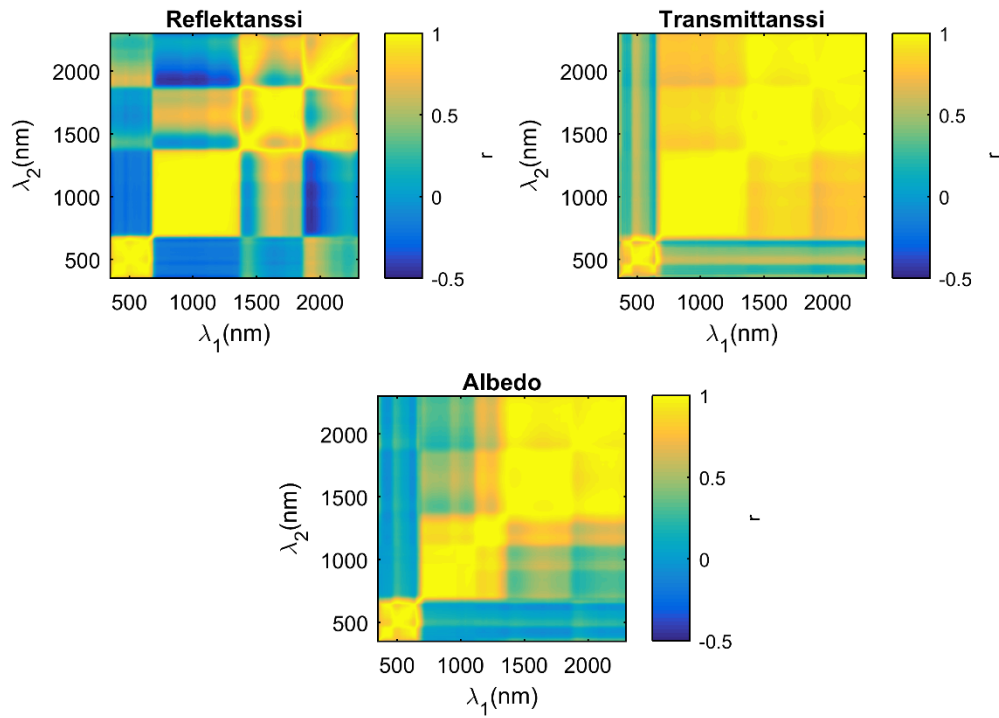
## 4.2 Kanavien väliset korrelaatiot

Tutkimalla albedojen aallonpituuskorrelaatioita huomattiin aallonpituuksien jakautuvan kolmeen ryhmään, joiden sisäiset korrelaatiot olivat suuria (kuvat 19 ja 20). Ryhmät vastaavat hyvin alueita VIS, NIR ja SWIR. Esimerkiksi lehtipuilla, aallonpituuden 509 nm korrelaatio oli yli 0,9 aallonpituuksien 424–703 nm kanssa. Vastaava korrelaatio saatiin 1000 nm:lla alueelle 743–1320 nm ja 1797 nm:lla alueelle 1336–2296 nm. Näin lähes koko mitattu spektri tuli katetuksi vain kolmea aallonpituutta tarkastelemalla. Havupuiden albedon osalta tulokset olivat hyvin samankaltaisia lukuun ottamatta veden absorptiokaistaa 1930 nm:n ympärillä, missä korrelaatio laski 62 %:iin. Reflektanssilla kaistojen ryhmittäminen oli albedoa selvempää. Transmittanssilla NIR- ja SWIR-alueet korreloivat selvästi myös keskenään, ryhmien sisäisten korrelaatioiden lisäksi. NIR- ja SWIR-alueiden väliin jäävässä kapeassa kaistassa korrelaatio molempien alueiden kanssa laski 87 %:iin lehtipuilla ja 88 %:iin havupuilla. VIS- ja NIR-ryhmien väliin jäävässä kaistassa korrelaatio laski selvästi heikommaksi: lehtipuilla 63 % ja havupuilla 65 %.

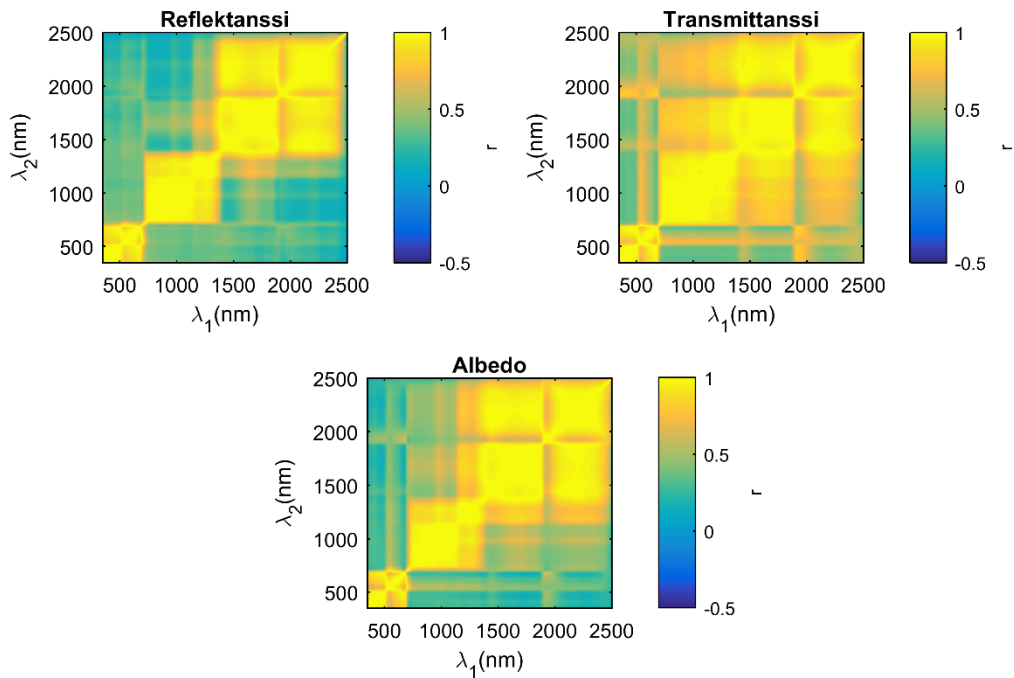
Tuloksia voi verrata Rothin et al. (2016) tutkimukseen, jossa reflektanssiaineiston hajontaa tarkasteltiin pääkomponenttianalyysin avulla. Kolmen ensimmäisen komponentin todettiin selittävän suurimman osan hajonnasta. Komponenttien huomattiin lisäksi korreloivan NIR-, SWIR- ja VIS-alueiden kanssa, komponenttijärjestyksessä. Aallonpituuksien ryhmittämisestä selittänee se, että aallonpituusalueen sisällä spektriin vaikuttavat samat tekijät: VIS-alueella pigmentit, NIR-alueella pinnan ominaisuudet sekä sisäinen rakenne ja SWIR-alueella sisäinen rakenne ja vesi.

Vaikka korrelaatiotutkimus osoittaa kolmen ryhmän kattavan suurimman osan koko aallonpituusalueesta, jää punainen reuna lähes kokonaan ryhmien ulkopuolelle. VIS- ja NIR-alueiden väliin jäävässä kapeassa kaistassa, korrelaatio naapurikaistojen kanssa laski selvästi. Heikkinen et al. (2010) tutkivat ylimääräisen, teoreettisen kaistan vaikutusta kuusen, männyn ja kahden koivulajin luokittelutarkkuuteen alueella 390–1070 nm. Tutkimuksessa reflektanssiaineistosta simuloitiin Leica ADS80 -ilmakuvakameraa vastaavat neljä kaistaa ja niiden avulla lasketut lajikohtaiset spektrit. Tämän jälkeen määritettiin viides kaista, jolla luokittelutulos paransi eniten. Paras sijainti uudelle kaistalle todettiin olevan 710–725 nm.

Heikkisen et al. (2010) tulokset vahvistavat punaisen reunan poikkeuksellista käyttäytymistä VIS- ja NIR-alueiden välissä.



Kuva 19 Aallonpituuksien  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  väliset korrelaatiot lehtipuumittauksille

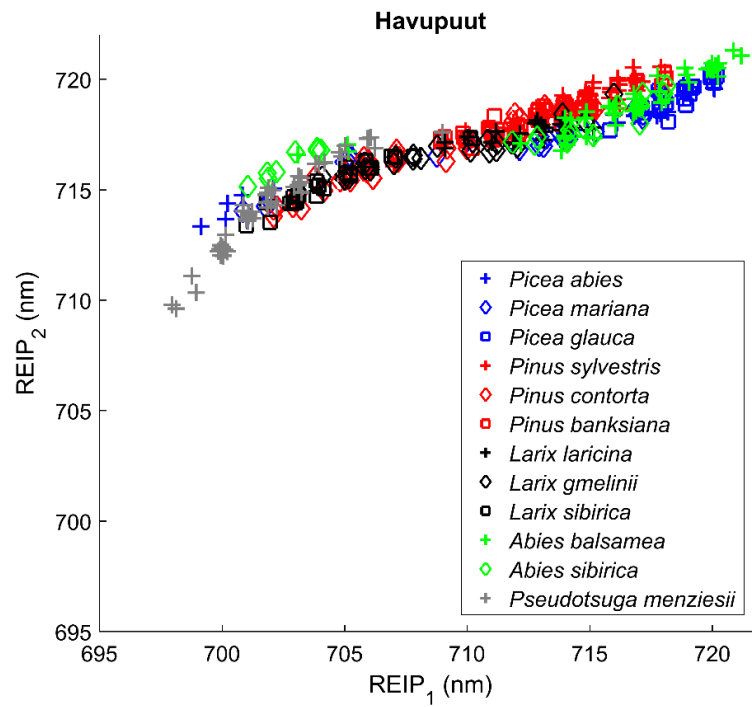
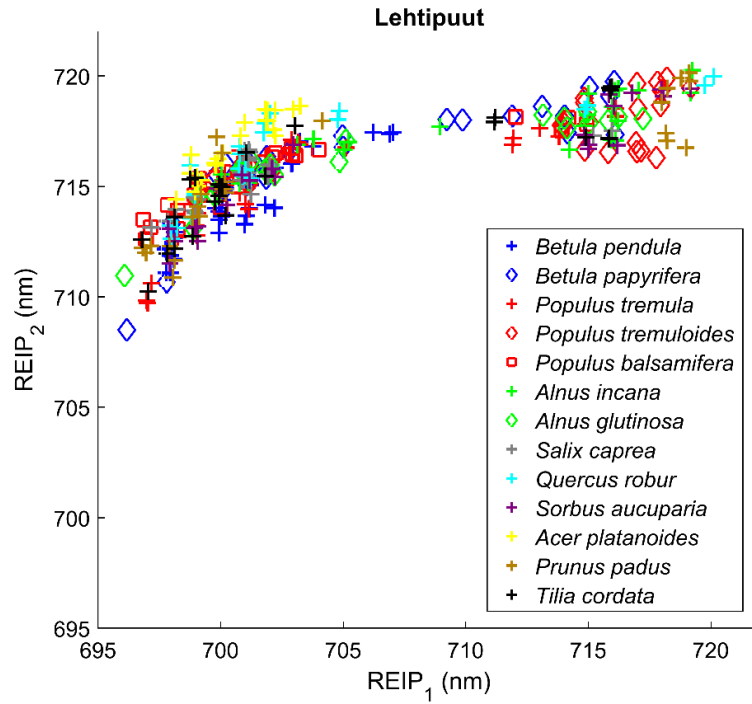


Kuva 20 Aallonpituuksien  $\lambda_1$  ja  $\lambda_2$  väliset korrelaatiot havupuumittauksille

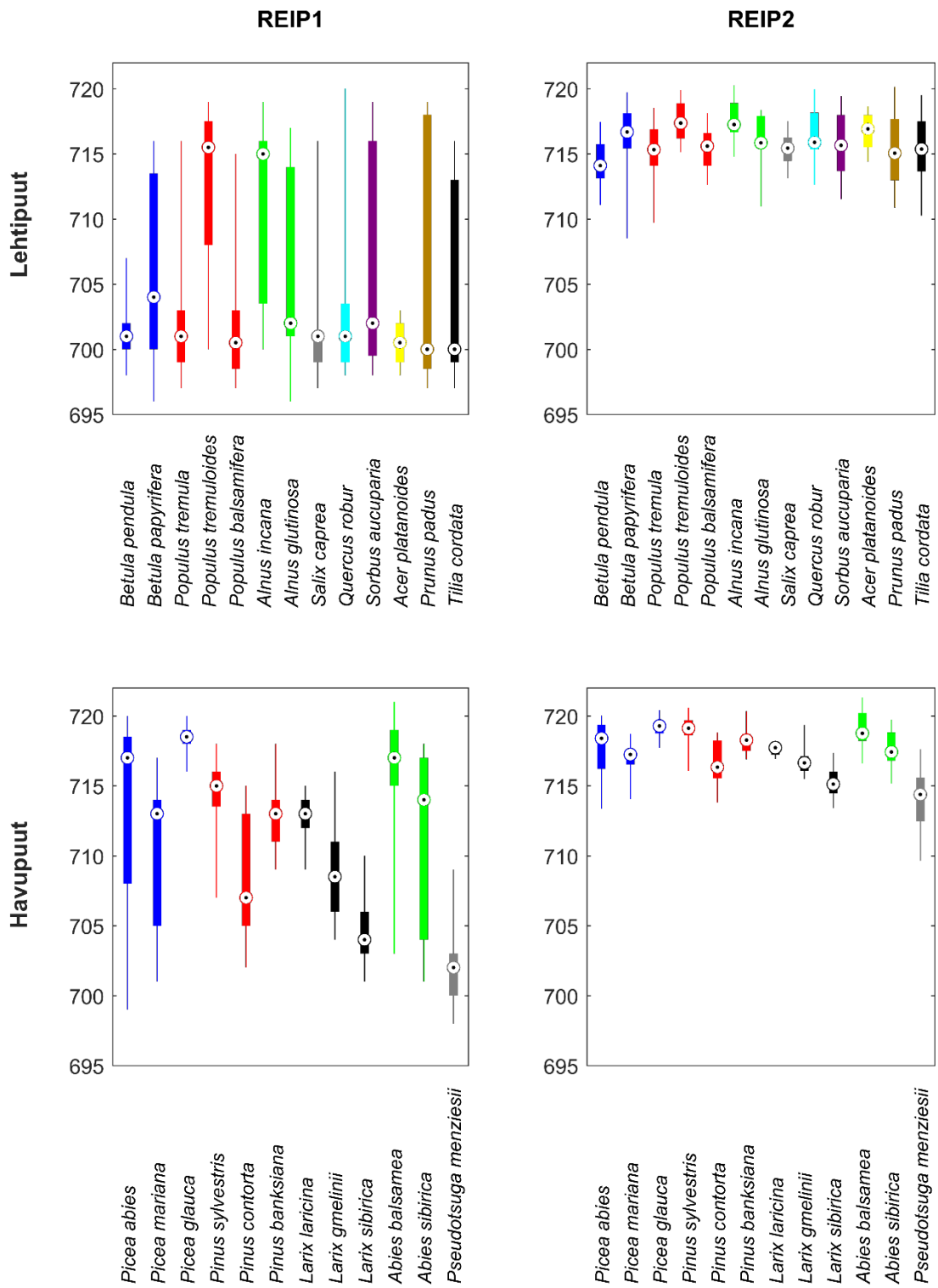
### 4.3 Punaisen reunan käännepisteen sijainti

Kuvassa 21 on esitetty kaikkien näytteiden albedospektrien REIP-arvot laskettuna molemmilla menetelmillä. Menetelmien väliset korrelaatiokertoimet olivat 0,79 lehtipuille ja 0,93 havupuille. REIP1-arvot jakautuivat kahteen ryhmään, mikä näkyy derivaattaspektrien kaksihuippuisuutena erityisesti lehtipuilla. Lisäksi hajonta REIP1-arvoilla oli REIP2-arvoja suurempaa. Molemmat havainnot ovat yhteneviä Cho ja Skidmoren (2006) viljelykasveilla tehtyjen mittausten kanssa.

REIP-arvojen mediaanit ja hajonnat lajeittain on esitetty kuvassa 22. REIP1-arvot olivat systemaattisesti REIP2-arvoja pienempiä. Menetelmästä riippumatta havupuulajien hajonnat olivat lehtipuiden hajontoja pienempiä. REIP2-arvojen lajikohtaiset hajonnat olivat alhaisemmat kuin REIP1-hajonnat, mutta myös kokonaishajonta oli alhaisempi. Pienemmän kokonaishajonnan huomasivat myös Cho ja Skidmore (2006) heijastusspektreistä lasketuista REIP-arvoista. Diplomityössä molemmat menetelmät antoivat kuitenkin samankaltaisia tuloksia lajien keskinäistä järjestystä verrattaessa, mikä vahvistaa tulosten luotettavuutta.



Kuva 21 Ensimmäisen derivaatan maksimiin perustuvat REIP-arvot (REIP<sub>1</sub>) ja lineaarisella neljän pisteen menetelmällä lasketut REIP-arvot (REIP<sub>2</sub>) kaikille lehti- ja havupuunäytteille. Hajontakuvioissa REIP<sub>1</sub>-arvoihin on lisätty pieni keinotekoinen satunnaisvirhe päällekkäisten symbolien välttämiseksi

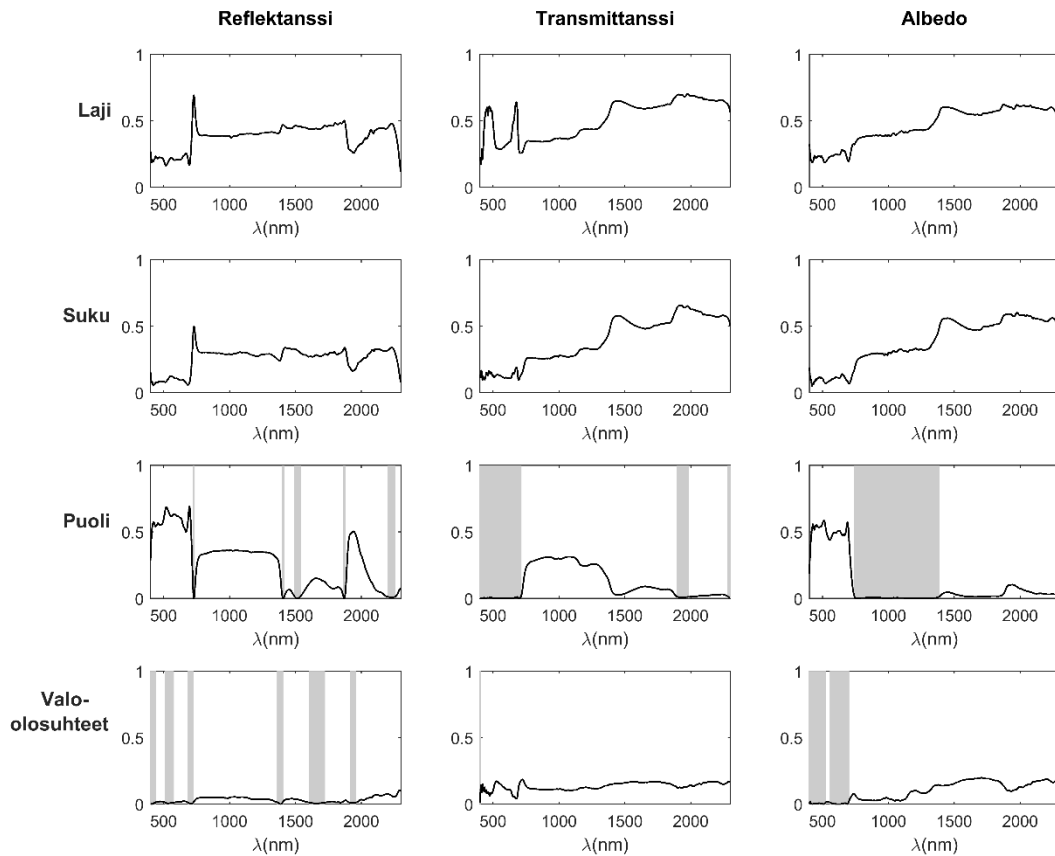


Kuva 22 REIP-arvoista muodostetut laatikkokaaviot lajikohtaiselle vaihtelulle. Kaavioissa mediaani on merkitty pallolla, ylä- ja alaneljännes tummalla janalla sekä minimi- ja maksimi-arvot ohuella janalla

#### 4.4 Spektreihin vaikuttavien tekijöiden tilastollinen analyysi

Varianssianalyysin perusteella lehtipuulajit erosivat toisistaan selvimmin SWIR-alueella (kuva 23). Maksimiselitysaste albedojen osalta 0,62 saatiin aallonpituudella 1875 nm. Vastaava selitysaste transmittanssilla oli 0,70 aallonpituudella 1975 nm. Lisäksi pigmenttiabsorption kaistat sinisen ja punaisen valon alueilla erottuivat muista VIS- ja NIR alueen kaistoista. Reflektanssilla suurin selitysaste oli 0,69 aallonpituudella 729 nm. Suvun selitysasteet muistuttivat piirteiltään lajin selitysasteita ja olivat albedolla keskimäärin 17 % lajin selitysasteita pienempiä. Tämä viittaa sukujen selittävän suuren osan lajikohtaisesta vaihte- lusta. Toisaalta tässä tutkimuksessa suurta osaa lehtipuusuvuista edusti vain yksi laji.

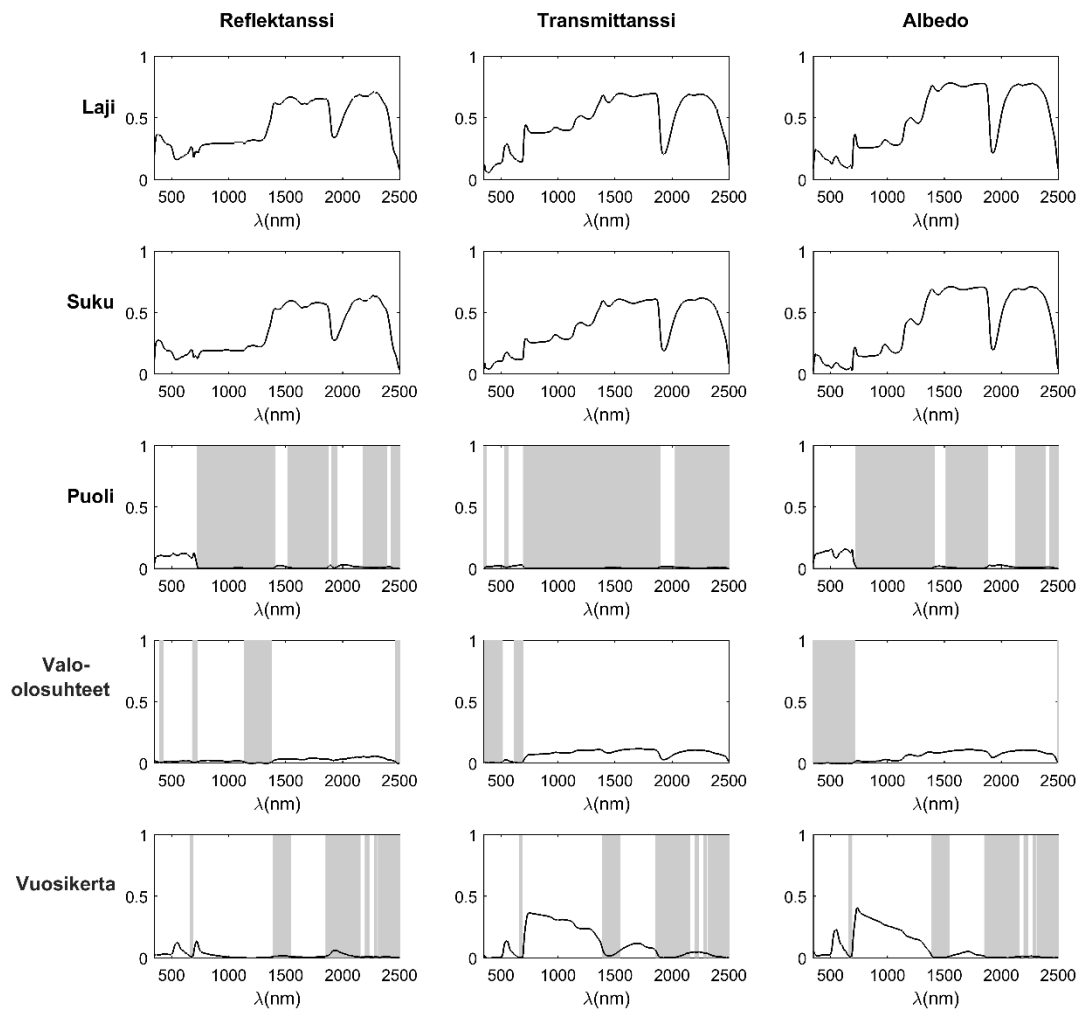
Lehden tai neulasen puolierojen vaikutus näkyi parhaiten VIS-alueen reflektanssispektrissä. Suurin selitysaste reflektanssilla oli 0,69 ( $\lambda = 696$  nm) ja albedolla 0,59 ( $\lambda = 511$  nm). Selitysasteiden perusteella latvuston valo-olosuhteiden vaikutus lehtipuuspektreihin oli vähäistä. Maksimiselitysaste oli 0,21 albedon aallonpituudelle 2297 nm.



Kuva 23 Eri tekijöiden selitysasteet lehtipuunäytteiden reflektanssille, transmittanssille ja albedolle. Tilastollisesti merkitsemättömät aallonpituudet ( $p \geq 0,05$ ) on merkitty harmaalla taustalla

Havupuilla laji- ja sukukohtaiset selitysasteet nousivat lehtipuiden vastaavia korkeammiksi (kuva 24). Suurimmat selitysasteet saatiin SWIR-alueella, poissulkien aallonpituudet veden absorptiokaistojen 1930 nm:n ja 2500 nm:n ympärillä. Lajieroista johtuvaa spektrivaihtelua ilmaisi parhaiten albedon aallonpituus 1552 nm, missä selitysaste oli 0,78. Reflektanssilla vastaava selitysaste oli 0,71 ( $\lambda = 2272$  nm) ja transmittanssilla 0,70 ( $\lambda = 1847$  nm). Suvun selitysasteet muistuttivat jälleen lajin selitysasteita ollen albedolla keskimäärin 15 % pienemmät.

Selitysasteet latvuston valo-olosuhteille ja näytteen puolelle olivat matalia. Valo-olosuhteiden maksimiselitysaste albedolle oli 0,12 ( $\lambda = 1707$  nm), reflektanssille 0,06 ( $\lambda = 2282$  nm) ja transmittanssille 0,12 ( $\lambda = 1698$  nm). Näytteen puolen maksimiselitysaste albedolle oli 0,16 ( $\lambda = 508$  nm), reflektanssille 0,13 ( $\lambda = 696$  nm) ja transmittanssille 0,03 ( $\lambda = 665$  nm). Neulasten vuosikerran maksimiselitysasteet olivat 0,41 albedon aallonpituudella 736 nm, 0,14 reflektanssin aallonpituudella 721 nm ja 0,37 transmittanssin aallonpituudella 747 nm. Koska vuosikerralla oli selvä vaikutus spektreihin, koko aineisto jaettiin vuosikerran perusteella kahteen ryhmään. Lajin, suvun, puolen ja valo-olosuhteiden selitysasteet tutkittiin ryhmille erikseen. Tekijöiden selitysasteet eivät eronneet selvästi vuosikertojen välillä. Ainoastaan puulajien väliset erot punaisen reunan alueella korostuivat tutkittaessa erikseen c0-vuosikertaa.



Kuva 24 Eri tekijöiden selitysasteet havupuunäytteiden reflektanssille, transmittanssille ja albedolle. Tilastollisesti merkitsemättömät aallonpituudet ( $p \geq 0,05$ ) on merkitty harmaalla taustalla. Puolien vaikutusta tutkivasta tarkastelusta on jätetty pois *Picea*-suvun ja kanadanlehtikuusen näytteet ja vuosikerran tarkastelusta kaikkien lehtikuusten näytteet

Lehti- ja havupuuspektreihin vaikuttavien tekijöiden selitysasteet ratkaistiin lisäksi REIP-arvoista (taulukko 6). Tarkastelun mukaan suurimmat REIP-arvoihin vaikuttavat tekijät olivat puulaji, suku ja lehtipuilla erityisesti näytteen puoli. Lajin ja suvun selitysasteet olivat havupuilla selvästi lehtipuita suuremmat. Puolen selvä vaikutus lehtipuiden reflektanssiin ja heikko vaikutus transmittanssiin huomattiin jo aallonpituuskohtaisista selitysasteista, jotka

eivät kuitenkaan nousseet REIP-arvoista laskettujen tasolle. Derivaattaspektrin maksimiin perustuvalla REIP1-menetelmällä saavutettiin suuremmat selitysasteet, kuin lineaariseen menetelmään perustuvalla REIP2-menetelmällä. Selvä poikkeus oli kuitenkin lehtien puolieroilla, missä REIP2-arvoihin perustuva selitysaste oli 30 prosenttiyksikköä suurempi. Latvuston valo-olosuhteiden selitysasteet jäivät pieniksi myös REIP-analysissä. Neulasten vuosikerran vaikutus REIP-arvoihin jäi vähäiseksi verrattuna aallonpituuskohtaisiin selitysasteisiin, vaikka kiinnostavat aallonpituudet sijaitsivatkin punaisen reunan alueella.

*Taulukko 6 Eri tekijöiden ja REIP-arvojen väliset selitysasteet. Tilastollisesti merkitsemättömät arvot ( $p \geq 0,05$ ) on merkitty harmaalla taustalla. Neulasten puolen vaikutusta tutkivasta tarkastelusta on jätetty pois Picea-suvun ja kanadanlehtikuusten näytteet ja vuosikerran tarkastelusta kaikkien lehtikuusten näytteet*

### Lehtipuut

Tekijä	Reflektanssi		Transmittanssi		Albedo	
	REIP1	REIP2	REIP1	REIP2	REIP1	REIP2
<b>Laji</b>	0,12	0,09	0,24	0,20	0,23	0,17
<b>Suku</b>	0,07	0,05	0,12	0,08	0,09	0,07
<b>Puoli</b>	0,45	0,75	0,03	0,04	0,16	0,31
<b>Valo-olosuhteet</b>	0,01	0,01	0,05	0,12	0,05	0,07

### Havupuut

Tekijä	Reflektanssi		Transmittanssi		Albedo	
	REIP1	REIP2	REIP1	REIP2	REIP1	REIP2
<b>Laji</b>	0,45	0,45	0,67	0,64	0,61	0,59
<b>Suku</b>	0,29	0,31	0,46	0,44	0,41	0,40
<b>Puoli</b>	0,14	0,10	0,00	0,00	0,02	0,02
<b>Valo-olosuhteet</b>	0,00	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01
<b>Vuosikerta</b>	0,07	0,10	0,11	0,15	0,09	0,14

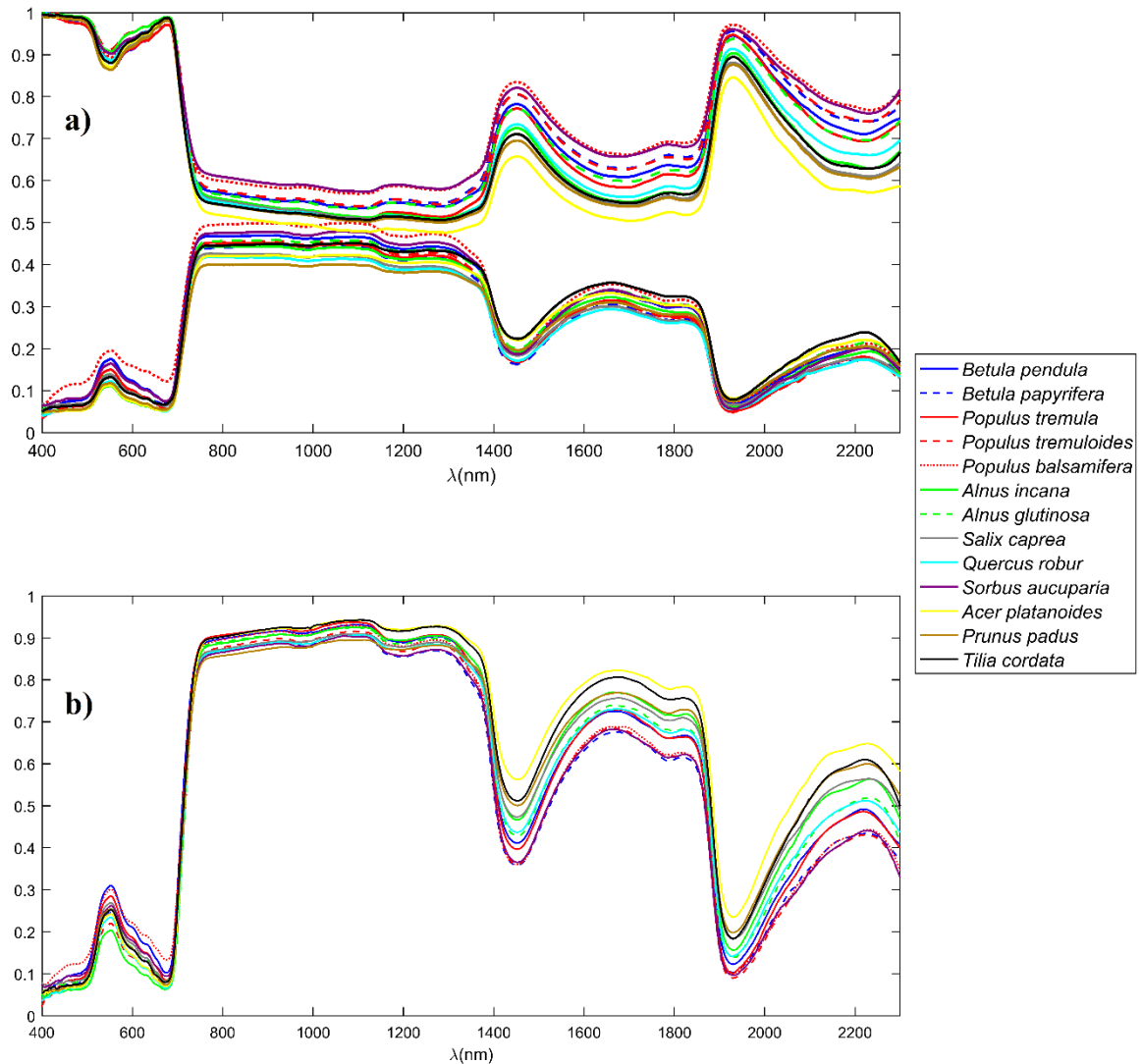
## 4.5 Spektreihin vaikuttavien tekijöiden laadullinen tarkastelu

### 4.5.1 Laji- ja sukuerot

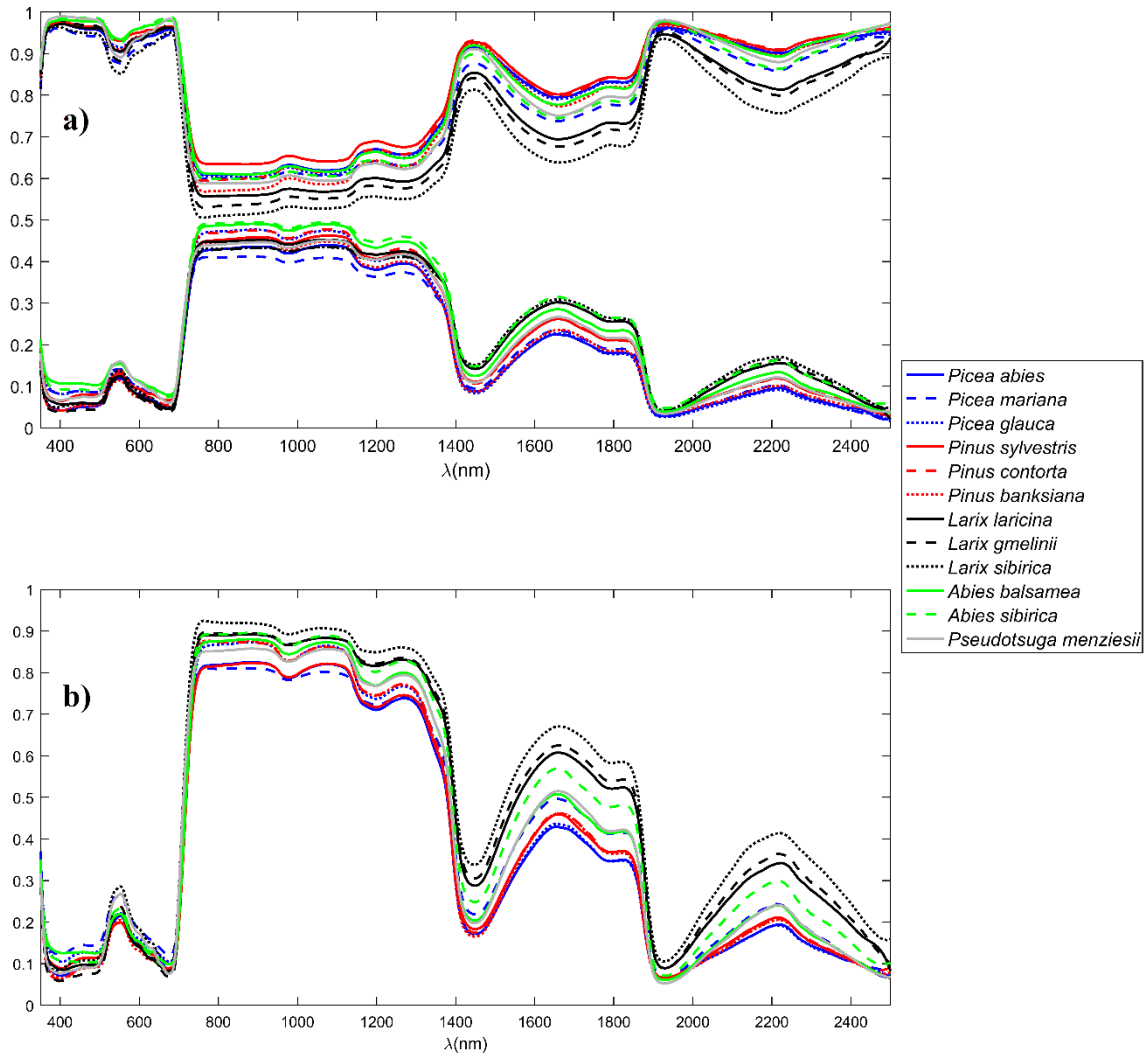
Laji- ja sukuerojen havainnollistaminen suoritettiin piirtämällä lajikohtaiset keskiarvospektrit (kuvat 25 ja 26). Tulokset ovat yhdensuuntaiset aiemmin esitettyjen selitysasteiden kanssa. Suurimmillaan lajierot näkyivät albedospektreissä SWIR-alueella. Tätä lyhyemmällä aallonpituuksilla lajit erosivat toisistaan eniten vihreän valon ja punaisen reunan alueilla. Erot NIR-alueella olivat pieniä, erityisesti lehtipuilla. Palsamipoppelin spektri poikkesi muista lehtipuulajeista koko näkyvän valon alueella. Havupuilla lajien väliset erot olivat keskimäärin suurempia kuin lehtipuilla, mutta lajien väliset erot olivat tasaisempia, eikä poikkeuksellisia lajeja esiintynyt.

SWIR-alueen merkitys lajien erottelussa on jäänyt huomaamatta vanhemmissa tutkimuksissa, joissa mitattu spektrialue on rajoittunut VIS- ja NIR-alueisiin. Uudemmissa tutkimuksissa yhteys on kuitenkin havaittu (Clark ja Roberts 2012, Lehmann et al. 2015, Roth et al. 2016). Lajispektrien ryhmittäminen sukujen perusteella oli selvää varsinkin havupuilla. Lehtikuusten spektrit olivat havupuille epätyypillisen korkeita ja muistuttivat enemmän lehtipuiden spektrejä (Noda et al. 2014). Havupuusukujen parempaa ryhmittymistä saattoivat selittää suuremmat rakenne-erot sukujen välillä. Neulaset ovat monen muotoisia ja kokoisia, kun taas lehtipuilla erona on lähinnä lehtien paksuus.

Lehtipuulajien albedojen pieni hajonta NIR-alueella selittyy pienillä rakenne-eroilla verrattuna havupuulajien välisiin eroihin. Kuten aiemmin todettu, lehden paksuuserot, mihin lajin voi olettaa vaikuttavan, näkyvät selvästi reflektansseissa ja transmittansseissa, mutta heikosti albedoissa. Palsamipoppelin poikkeavaa VIS-alueen heijastusta selittää abaksiaalisen puolen korkea heijastus. Castro ja Sanchez-Azofeifa (2008) mittasivat palsamipoppelista amerikanhaapaa pienempiä klorofyllipitoisuuksia, mikä vahvistaisi eroa klorofylleille herkällä VIS-alueella. Samassa tutkimuksessa huomattiin lisäksi palsamipoppelin korkea heijastus NIR-alueella. Luotettavia johtopäätöksiä tutkimusten välillä ei voida kuitenkaan tehdä, koska Castron ja Sanchez-Azofeifan (2008) tutkimusnäytteet oli kerätty loppukesästä ja alkusyksystä.



Kuva 19 Lehtipuiden lajikohtaiset keskiarvospektrit a) reflektanssille ja transmittanssille b) albedolle

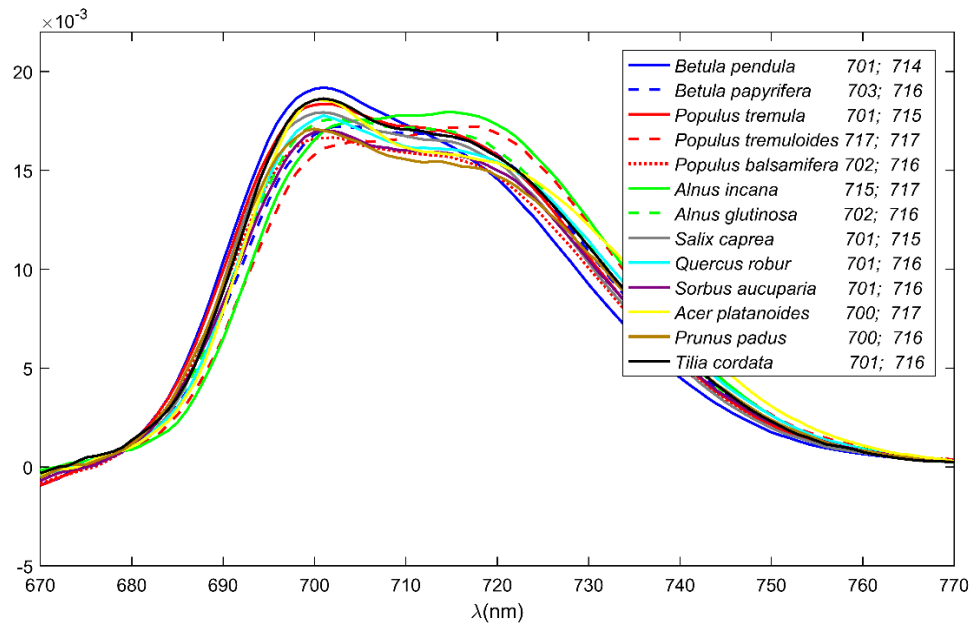


Kuva 26 Havupuiden lajikohtaiset keskiarvospektrit a) reflektanssille ja transmittanssille b) albedolle

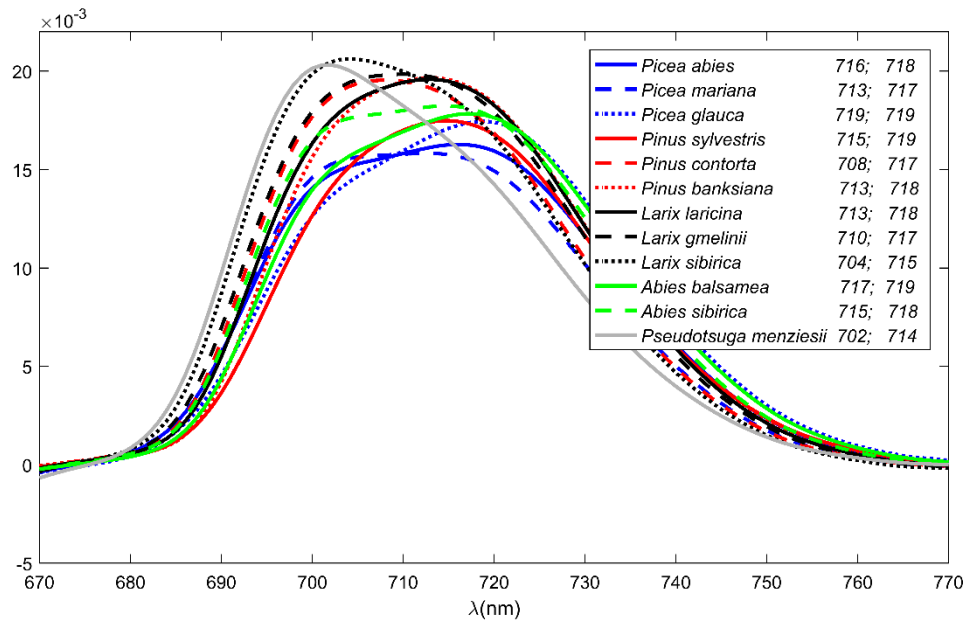
Laji- ja sukueroja selvitettiin lisäksi punaisen reunan derivaattaspektreistä (kuvat 27 ja 28). Kuten selitysasteista voitiin päätellä, havupuulajien ja -sukujen väliset erot näkyivät lehtipuuta selkeämmin derivaattaspektreissä ja molemmissa REIP-arvoissa. Lehtipuulajeista erotui kaksi puulajia, amerikanhaapa ja harmaaleppä, joiden derivaattamaksimien paikat (REIP1-arvot) olivat selvästi muita lajeja korkeammat. Havupuujoukosta douglaskuusi erotui matalilla REIP-arvoillaan. Punaisen reunan derivaattaspektrit erosivat toisistaan paitsi maksimien sijainnin myös muiden spektrin ominaisuuksien perusteella. Esimerkiksi havupuiden derivaattaspektrit muistuttivat yksihiippuisia normaalijakaumia, kun taas lehtipuilla ilmeni voimakkaampaa kaksihuippuisuutta. Derivaattaspektrien muodot erosivat toisistaan usein, vaikka lajeilla oli samat REIP1-arvot.

Cochrane (2000) tutki punaisen reunan derivaattaspektrin hyödyntämistä lajiluokittelussa. Maksimia vastaavan aallonpituuden lisäksi potentiaalisiksi tunnusluvuiksi huomattiin maksimin voimakkuus sekä neljä tilastollista tekijää: normaalijakaumaa muistuttavan derivaattaspektrin keskiarvo, varianssi, huipukkuus (*kurtosis*) ja vinous (*skewness*). On syytä myös harkita toisistaan poikkeavia laskutapoja lehti- ja havupuuspektrien punaisen reunan sisältämän informaation irrottamiseksi. Derivaatan maksimiin perustuvan menetelmän on todettu

toimivan heikosti monihuippuisen derivaattaspektrin mallintamisessa (Cho ja Skidmore 2006).



Kuva 27 Lajikohtaisten albedojen derivaattaspektrit lehtipuunäytteille sekä vastaavat REIP1- ja REIP2-arvot



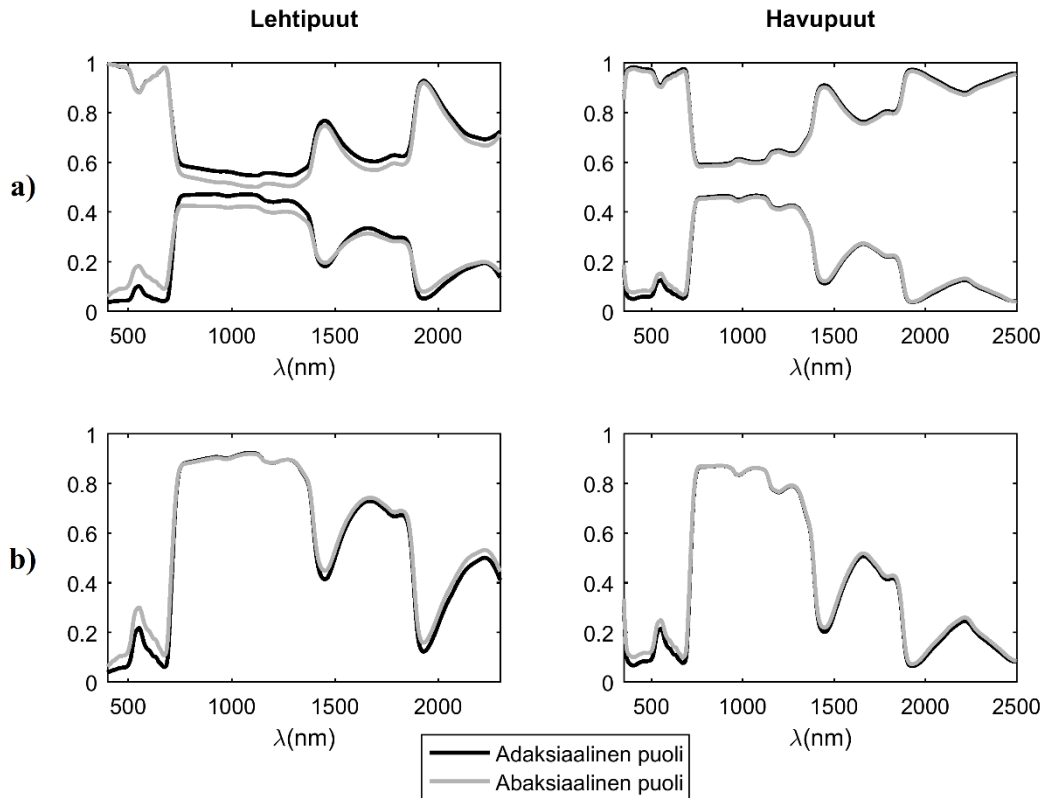
Kuva 28 Lajikohtaisten albedojen derivaattaspektrit havupuunäytteille sekä vastaavat REIP1- ja REIP2-arvot

## 4.5.2 Lehtien ja neulasten puolierot

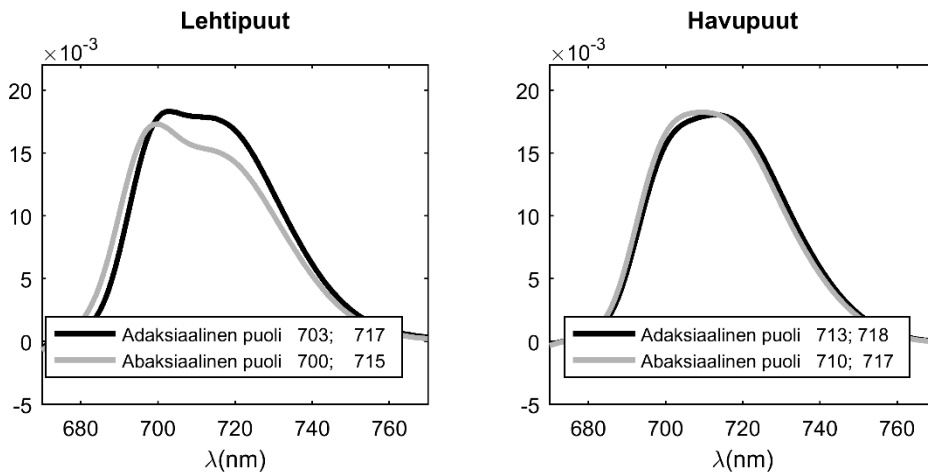
Adaksiaalisen ja abaksiaalisen puolen erot ilmenivät voimakkaimmin näkyvän valon reflektansseissa, missä tasoero lehtipuilla oli suurimmillaan 0,09 aallonpituudella 696 nm ja havupuilla 0,03 aallonpituudella 573 nm (kuva 29). Molemmissa abaksiaaliset reflektanssit olivat adaksiaalisia suurempia. VIS-alueen transmittanssit olivat lähes identtiset. Puolierot vaikuttivat lehtipuiden *R*- ja *T*-spektreihin selvästi myös NIR- ja SWIR-alueilla. Vaikka havupuilla puolierot olivat pienempiä, poikkesivat *Abies*- ja *Pinus*-sukujen spektrit selvästi havupuiden keskiarvosta. *Abies*-suvun abaksiaalisen puolen reflektanssi oli poikkeuksellisen korkea koko näkyvän valon alueella. Suurimmillaan ero oli aallonpituudella 374 nm, missä adaksiaalinen reflektanssi oli 0,05 ja abaksiaalinen reflektanssi 0,17. Ero pihtaneulasten puolessa oli silmin nähtävä. *Pinus*-suvun VIS-alueen reflektanssi käyttäytyi päinvastaisesti kuin muilla lajeilla: adaksiaalinen puoli oli abaksiaalista kirkkaampi.

Erot puolien *R*- ja *T*-spekreissä täsmäävät hyvin Lukešin et al. (2013) tulosten kanssa. Siinä suurimmat erot mitattiin näkyvän valon alueelta ja olivat suuruudeltaan 0,10 koivulle ja 0,04 männylle. Puolten poikkeavuutta VIS-alueella selittävät erot pinnan ominaisuuksissa. Abaksiaalisen puolen pinnassa on vähemmän absorboivia klorofylleja sekä näkyvää valoa voimakkaasti heijastavia rakenne-elementtejä kuten karvoja (Gausman ja Allen 1973). Mittauspuolen vähäinen vaikutus transmittanssiin VIS-alueella on todettu useissa aiemmissä tutkimuksissa (Demarez et al. 1999, Lukeš et al. 2013, Möttus et al. 2014). Syyt *Abies*-suvun voimakkaisiin puolieroihin ovat ilmaraoissa, jotka ovat suvulle tyypillisesti keskittyneet abaksiaaliselle puolelle. *Pinus*-suvun käyttäytyminen VIS-alueella selittyy poikkeuksellisen alhaisella abaksiaalisella reflektanssilla, mutta syy tähän on epäselvä. On mahdollista, että abaksiaalisen puolen kupera muoto vaikuttaa mitattuun heijastukseen.

Kuvassa 30 on esitetty lehden tai neulaseen puolierojen vaikutus derivaattaspektriin. Sekä lehti- että havupuilla adaksiaalisen puolen REIP1- ja REIP2-arvot olivat abaksiaalista puolta suuremmat. Vaikka erot lehti- ja havupuiden REIP1-arvoissa olivat identtiset, puolen vaikutus derivaattaspektrien muotoon oli lehtipuilla voimakkaampaa. Puolien vaikutusta punaisen reunan spektriin on aikaisemmin tutkittu heikosti, mutta tulokset ovat silti odotettuja, koska abaksiaalisen puolen vähäisempi klorofylliabsorptio pienentää REIP-arvoja.



Kuva 29 Lehden ja neulasen puolen vaikutus a) reflektanssiin ja transmittanssiin b) albedoon. Vain yhdeltä puolelta mitatut *Picea*-suvun ja kanadanlehtikuusen näytteet eivät sisälly analyysiin



Kuva 30 Lehden ja neulasen puolen vaikutus derivaattaspektreihin sekä REIP1- ja REIP2-arvot albedoille. Vain yhdeltä puolelta mitatut *Picea*-suvun ja kanadanlehtikuusen näytteet eivät sisälly analyysiin

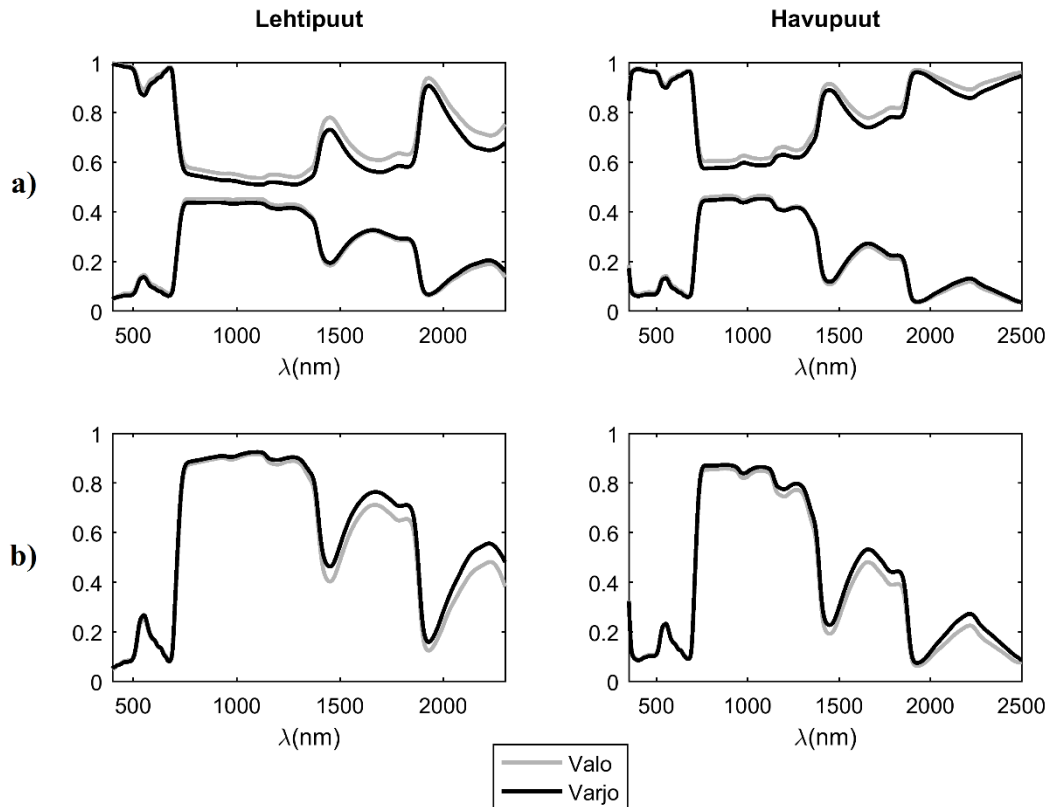
### 4.5.3 Latvuston valo-olosuhteiden vaikutus

Latvuston valo-olosuhteiden vaikutus *R*- ja *T*-spektreihin (kuva 31) sekä punaisen reunan alueeseen (kuva 32) oli samankaltainen sekä lehti- että havupuille. Suurimmat erot (suhteelliset ja absoluuttiset) löytyivät SWIR-alueen transmittansseista, missä suurin tasoero lehtipuilla oli 0,07 aallonpituudella 2300 nm ja havupuilla 0,04 aallonpituudella 1720 nm. VIS- ja NIR -alueiden heijastusten huomattiin olevan suurempia suoralle valolle altistuneilla näyt-

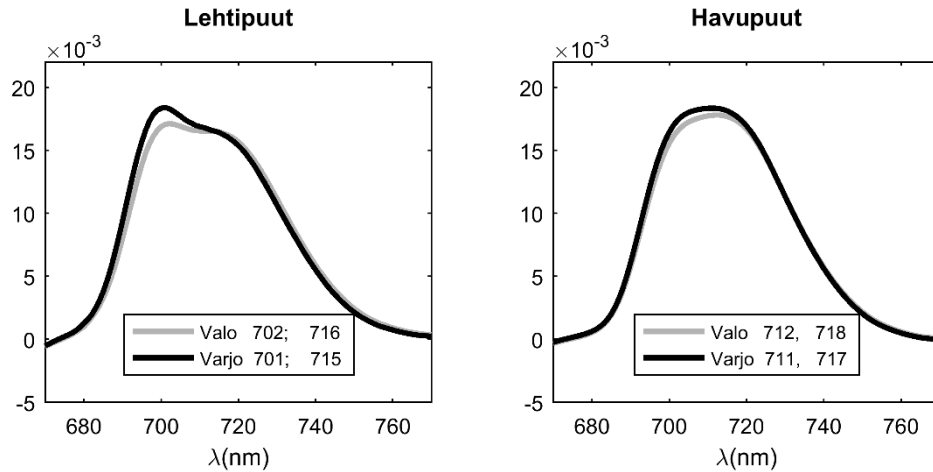
teillä. SWIR-alueella ilmiö oli päinvastainen. Valo-olosuhteilla oli kuitenkin pienempi vaikutus reflektanssiin kuin transmittanssiin koko mitatun spektrin alueella. Derivaattaspektrit eivät olleet herkkiä valo-olosuhteiden muutoksille erojen ollessa kuitenkin yhtä suuret ja samansuuntaiset molemmille puutyypeille. Suoralle valolle altistuminen siirsi keskiarvospektrien REIP-arvoja systemaattisesti yhden nanometrin oikealle. Valo-olosuhteiden vaikutus oli melko yhdenmukaista lajista tai suvusta riippumatta. Pieniä eroja havupuusukujen välillä kuitenkin ilmeni. Esimerkiksi *Picea*-suvun suoralle valolle altistuneiden näytteiden heijastus oli 19 % varjo näytteitä korkeampi aallonpituudella 555 nm ja 5 % aallonpituudella 1000 nm. *Pinus*-suvulla vastaavat erot olivat 3 % ja 0,0 %.

Lehtipuiden osalta tulokset tukevat aikaisempia spektrimittauksia (Knapp ja Carter 1998, Lukeš et al. 2013, Noda et al. 2014). Tutkimuksissa latvuston valo-olosuhteiden merkitys on todettu pieneksi ja vaikuttavan transmittanssiin reflektanssia enemmän. Havupuiden osalta tulokset ovat yhtenevät O'Neillin et al. (2002) tutkimuksen kanssa, missä neulasten VIS-alueen heijastuksen havaittiin kasvavan siirryttäessä ylöspäin sitkankuusen latvustossa. Lukešin et al. (2013) tutkimustulokset metsäkuusen ja metsämännyn spektrimittauksista ovat kuitenkin ristiriidassa diplomityön tulosten kanssa. Lukeš et al. (2013) havaitsivat selviä eroja valo- ja varjonäytteiden reflektansseissa. Lisäksi Lukes et al. (2013) havaitsivat heijastuserojen NIR-alueella olevan läpäisyeroja suurempia, mikä ei ole yhdenmukaista diplomityön tulosten kanssa. Albedon kannalta ristiriita on merkittävä, sillä Lukešin et al. (2013) tutkimuksessa, suoralle valolle altistuvien neulasten NIR-alueen albedo oli varjoneulasten albedoa korkeampi. Diplomityössä latvuston valo-olosuhteiden vaikutus oli pienempi ja päinvastainen. Vertailu Lukešin et al. (2013) tutkimukseen suoritettiin tutkimalla vain metsäkuusen ja metsämännyn spektrejä, ei havupuiden keskiarvospektrejä.

Kasvien on huomattu kompensoivan heikkoja valo-olosuhteita klorofyllipitoisuuksia kasvattamalla (Gausman 1984), mikä selittää varjonäytteiden pienemmän heijastuksen VIS-alueella. O'Neill et al. (2002) mittasivat neulasten suurimmat klorofyllin, ligniinin ja selluloosan pitoisuudet latvuston alimmasta kerroksesta. Kuitenkin vain klorofyllillä huomattiin olevan merkitsevä vaikutus heijastusspektriin. Varjonäytteiden korkeampi transmittanssi koko mitatun spektrin alueella selittyy paksuuseroilla. Varjolehtien on todettu olevan suoralle valolle altistuvia lehtiä ohuempia (Gausman 1984). Mittauskampanjassa näytteiden selkeä jakaminen valo- ja varjoluokkiin oli haastavaa. Puun koko, latvuston rakenne sekä ympäröivä metsä aiheuttivat selviä eroja mitattavien puiden valo-olosuhteissa. Tämä saattoi osaltaan vaikuttaa laji- ja sukukohtaisiin eroihin. Esimerkiksi kuusen alaoksat olivat selkeästi varjossa ja yläoksat valossa. Männyllä erottelu oli vaikeampaa, sillä latvuston rakenteesta johtuen selkeitä varjo-oksia ei esiintynyt ja neulasten altistuminen valolle oli melko tasaista. Ilmiö aliarvioi valo-olosuhteiden vaikutusta *Pinus*-suvun spektreihin. Lisäksi valonäytteiden kerääminen korkeiden puiden latvustoista oli ajoittain mahdotonta, jolloin erot valo-olosuhteissa kaventuivat.



Kuva 31 Valo- ja varjonäytteiden keskiarvospektrit a) reflektanssille ja transmittanssille b) albedolle



Kuva 32 Valo- ja varjonäytteiden albedospektreistä lasketut derivaattaspektrit sekä vastaavat REIP1- ja REIP2-arvot

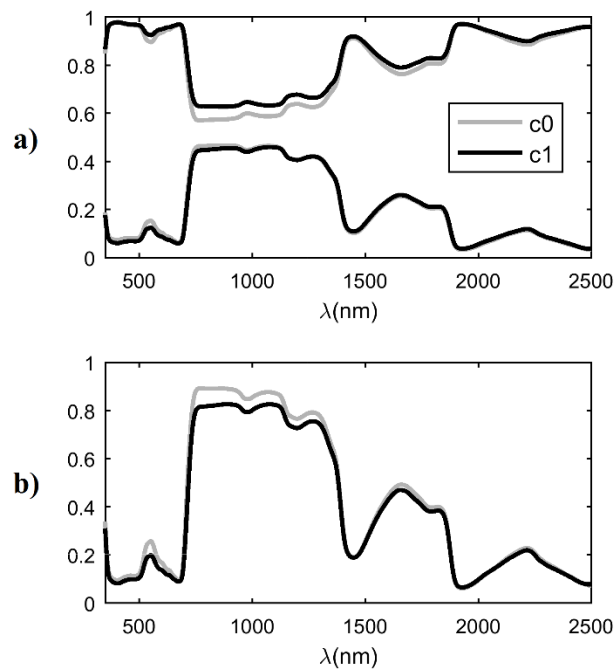
#### 4.5.4 Neulasvuosikerta

Neulasvuosikerralla oli selvä vaikutus heijastus-, läpäisy- ja albedospektreihin sekä derivaattaspektriin (kuvat 33 ja 34). Suurimmat tasoerot mitattiin VIS- ja NIR-alueiden albedoista, missä c0-vuosikerta oli c1-vuosikertaa kirkkaampi. Maksimiero oli 0,09 aallonpituudella 726 nm. Vuosikertojen suhteellisissa eroissa korostuivat kaksi kapeaa aallonpituusaluetta: vihreän valon absorptiominimi, missä albedoero oli suurimmillaan 26 % ( $\lambda = 550$  nm) sekä punaisen reunan alue, missä albedojen maksimiero oli 21 % ( $\lambda = 702$  nm). Albedon tasoeroja selitti erityisesti *T*-spektri, jonka erot olivat selvästi *R*-spektriä suuremmat, lukuun ottamatta

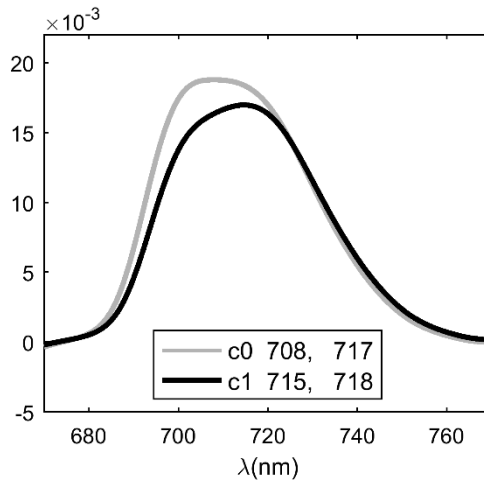
sinisen valon ja ultravioletin alueita. Koska erot NIR-alueen alkupäässä olivat suuria, näkyivät vuosikerran vaikutukset myös derivaattaspektrin maksimin paikassa ja suuruudessa.

Daughtry et al. (1989) havaitsivat vastaavat vuosiluokkien erot tutkiessaan mustakuusen näkyvän valon heijastus- ja läpäisy-spektrejä. NIR-alueen tulokset erosivat diplomityön tuloksista kuitenkin transmittanssin osalta, missä Daughtry et al. (1989) mittasivat c0-ikäluokalle c1-ikäluokkaa pienempiä arvoja. O'Neill et al. (2002) tutkimuksessa vertailtiin vuosikertojen reflektansseja kahdeksalla eri aallonpituusalueella: sinisen ja punaisen absorptiomaksimin, vihreän absorptiominimin, punaisen reunan sekä neljän eri veden absorptiokaistan alueilla. Suhteelliset erot olivat lähellä diplomityössä tehtyjä havaintoja, lukuun ottamatta punaista reunaan, missä O'Neill et al. (2002) mittasivat uusimmalle vuosikerralle matalia reflektansseja verrattuna vuotta vanhempiin neulasiin. Samassa tutkimuksessa vuosikerran vaikutusta punaisen reunan sijaintiin ei havaittu, vaikka klorofyllipitoisuuden korrelaatio punaisen reunan aallonpituuksien kanssa oli vahvasti negatiivinen ( $r = -0,8$ ). Lukešin et al. (2013) kuusimittaukset täsmäsivät erinomaisesti omien tulosten kanssa, lukuun ottamatta pieniä SWIR-alueen poikkeamia, jotka olivat kuitenkin keskihajontoja pienempiä.

Vuosikerran vaikutus  $R$ - ja  $T$ -spektreihin on selvää ja hyvin tunnettu. Merkittävä VIS-alueen spektriin vaikuttava tekijä on klorofyllipitoisuus, joka c0-ikäluokalla on muita ikäluokkia matalampi (O'Neill et al. 2002). Vuosikerran voi olettaa vaikuttavan neulasen paksuuteen, mikä selittäisi erot NIR- ja SWIR-alueiden transmittanssissa.



Kuva 33 Neulasnäytteiden c0- ja c1-vuosikertojen keskiarvospektrit a) reflektanssille ja transmittanssille b) albedolle. Kesävihannoivien lehtikuusten näytteet eivät sisälly vertailuun



Kuva 34 Neulasnäytteiden c0- ja c1-vuosikertojen albedospektreistä lasketut derivaattaspektrit sekä vastaavat REIP1- ja REIP2-arvot. Kesävihannoivien lehtikuusten näytteet eivät sisälly vertailuun

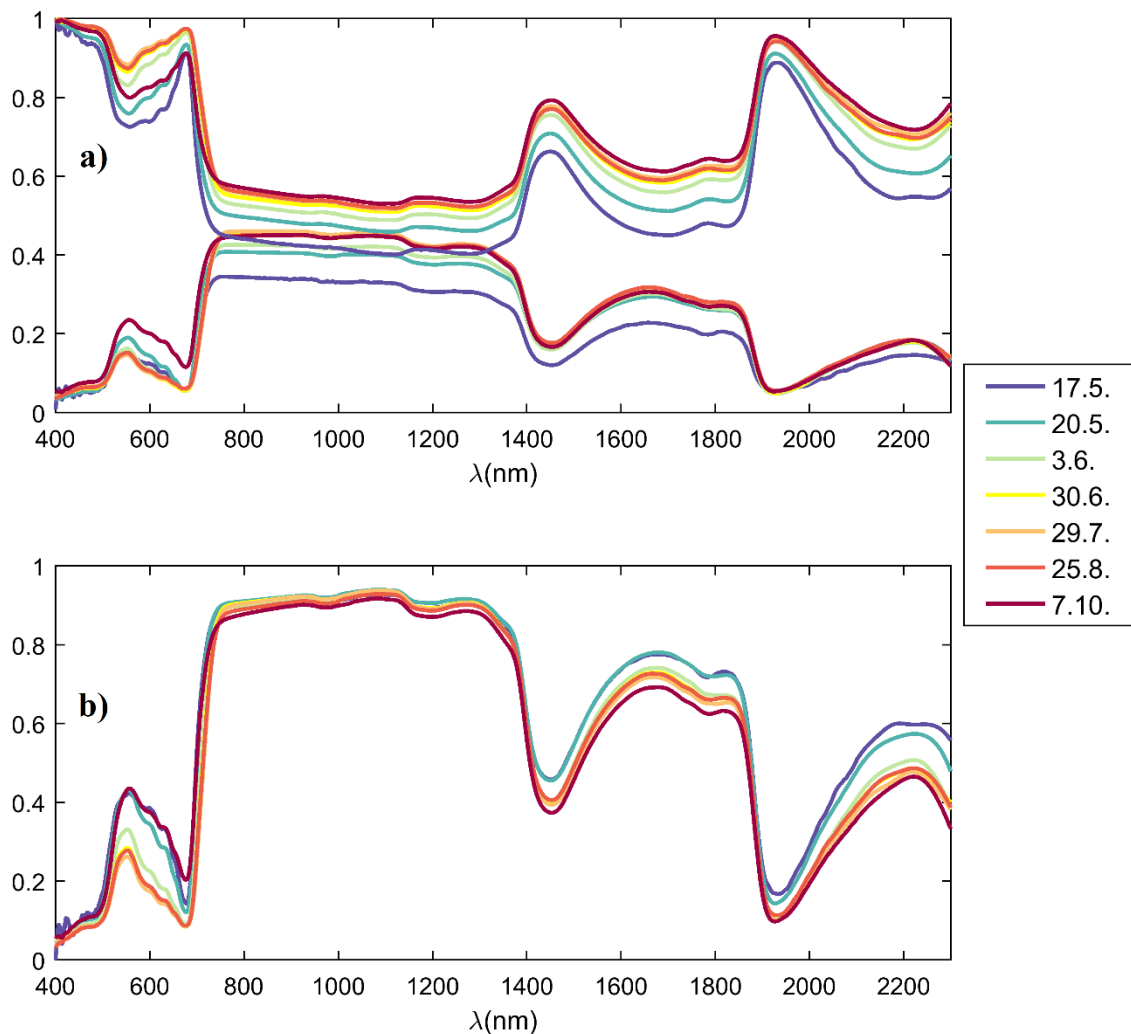
#### 4.5.5 Kasvukauden vaiheen vaikutus

Kasvukauden vaiheen vaikutukset olivat samankaltaiset sekä koivulle että haavalle (kuva 35). Ainoastaan toukokuun 17. päivän mittauksissa koivu erosi selvästi haavasta suuremmalla heijastuksella ja pienemmällä läpäisyllä. Ajankohdan vaikutus koivun ja haavan albedoihin korostui VIS- ja SWIR-alueilla. VIS-alueella näytteet jakoutuivat kahteen ryhmään, joista ensimmäinen, korkean albedon omaava ryhmä, koostui toukokuun ja lokakuun mittauksista. Toinen ryhmä, jonka spektrit muistuttivat enemmän tyypillistä vihreän kasvilisuuden spektriä, koostui kesä-, heinä- ja elokuun mittauksista. SWIR-alueen albedo laski läpi kasvukauden. Kasvukauden vaiheella ei ollut suurta vaikutusta NIR-alueen albedoon, vaikka erot alueen R- ja T-spektreissä olivat merkittävät. Ajankohdan vaikutus oli samankaltainen molemmille puolille.

Vihreän valon absorptiominimissä albedo laski haavalla toukokuun 0,43:sta heinäkuun 0,26:n. Elokuun mittauksessa albedo oli jo hieman noussut (0,28) ja maksimiarvon se saavutti lokakuussa (0,44). Koivun albedo laski 0,47:stä 0,28:n toukokuusta elokuulle, jonka jälkeen se nousi jyrkästi 0,49:een. Punaisen valon absorptiomaksimissa haavan albedo kasvoi välillä 0,08–0,14 varsinaisen kasvukauden aikana, toukokuulta elokuulle. Lokakuussa albedo nousi maksimiinsa (0,20). Koivulla vastaava muutos toukokuulta elokuulle oli 0,10–0,14 ja lokakuun mittausmaksimi oli 0,20. Koko NIR-alueella ajankohdan vaikutus oli vähäistä: molemmilla lajeilla albedo vaihteli välillä 0,90–0,92 ( $\lambda = 900$  nm).

Möttus et al. (2014) tutkivat harmaalepän ja rauduskoivun spektrejä Virossa, ajanjaksolla 30.4.–22.9.2008. Tutkimuksia voi pitää hyvin vertailukelpoisina yhtenevien olosuhteiden ja yhteisen lajin takia. Albedon vaihteluväli vihreän valon alueella oli koivulla 0,22–0,42 ja lepällä 0,18–0,35. Koivun albedon vaihtelu vastasi diplomityön tuloksia, vaikka absoluuttisia arvoja oli vaikea verrata erilaisista mittaustavoista johtuen. Punaisen valon alueella muutos oli hieman pienempää kuin diplomityössä. Havainnot NIR-alueen albedon muuttumattomuudesta olivat yhtenevät molemmissa tutkimuksissa. Möttus et al. (2014) havaitsivat spektrien jyrkät nousut ylimääräisessä, lokakuun puolivälissä tehdyssä mittauksessa. Omaan tutkimuksen perusteella nousun olisi pitänyt näkyä jo syyskuun lopun mittauksissa, mutta ero mittausvuosissa ja pienet erot ilmasto-olosuhteissa selittänevät vaihtelut tutkimusten välillä.

Kasvukauden lopussa tapahtuva reflektanssin ja transmittanssin nopea kasvu VIS-alueella on havaittu aikaisemmissa tutkimuksissa (Brakke et al. 1993, Demarez et al. 1999). Ilmiö selittyy kellastumisessa tapahtuvalla klorofyllien hajoamisella sekä soluseinämien luhistumisella (Boyer et al. 1988). On oletettavaa, että muutokset NIR-alueen *R*- ja *T*-spektreissä johtuvat paksuuseroista. Lehtien paksuuntuminen kasvukauden aikana kasvattaa reflektanssia ja vähentää transmittanssia. Ilmiö vaikuttaa koko mitattuun spektriin, mutta näkyvän valon alueella kevään ja kesän aikana tapahtuva mahdollinen klorofyllipitoisuuden nousu kompensoi osan paksuuden aiheuttamasta heijastuksen kasvusta.

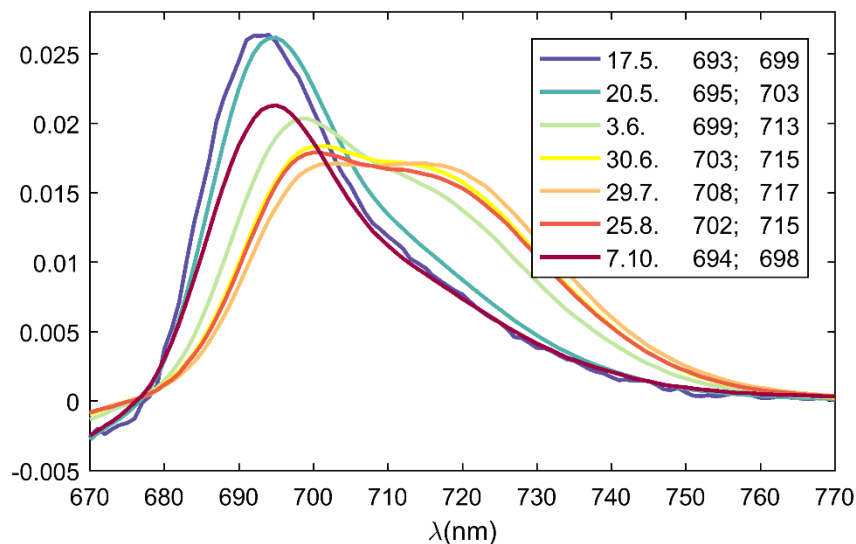


Kuva 35 Haavan keskiarvospektrien kehitys kasvukauden aikana a) reflektanssille ja transmittanssille b) albedolle

Kasvukauden vaiheen vaikutus molempien lajien punaiseen reunaan oli selvää. Ajankohdan vaikutus haavan ensimmäiseen derivaattaspektriin ja REIP-arvoihin on esitetty kuvassa 36. Haavan derivaattaspektrin maksimin paikka kasvoi toukokuun puolivälistä (REIP1 = 693 nm) heinäkuun loppuun (REIP1 = 708 nm). Elokuun lopun mittausten REIP1-arvo oli jo laskenut (702 nm) ja lokakuussa se palasi kevään tasolle (REIP1 = 694 nm). Koivulla vastaavat arvot kasvoivat toukokuulta elokuun loppuun asti (REIP1 = 696–703 nm) kunnes laskevat selvästi lokakuulle tultaessa (REIP1 = 693 nm). Vastaava kehitys toistui REIP2-arvoissa. Kasvukauden vaiheen selitysasteet laskettiin albedosta ja reflektanssista saaduille

REIP-arvoille. Albedosta ratkaistut ajankohdan selitysasteet olivat haavalle 0,53 (REIP1) ja 0,61 (REIP2). Koivulle vastaavat arvot olivat 0,46 (REIP1) ja 0,50 (REIP2). Reflektansseista lasketut selitysasteet olivat haavalle 0,40 (REIP1) ja 0,48 (REIP2), ja koivulle 0,37 (REIP1) ja 0,45 (REIP2). Selitysasteisiin vaikuttaa kuitenkin mittausten epätasainen jakautuminen kasvukaudelle, mikä heikentää tilastollisen tarkastelun luotettavuutta.

Möttus et al. (2014) löysivät vastaavan yhteyden reflektanssin ensimmäisen derivaattaspekttrin maksimin ja kasvukauden vaiheen välille, vaikka maksimien paikat oli laskettu systemaattisesti suuremmiksi. Diplomityössä albedon havaittiin soveltuvan reflektanssia paremmin derivatiiviseen aikaseurannan spektritutkimukseen. Kasvukauden vaiheen selvää vaikutusta punaiseen reunan sijaintiin selittävät todennäköisesti VIS-alueen spektrikehitys klorofyllipitoisuuden muutosten takia sekä NIR-alueen muutokset lehden paksuuserojen seurauksena. Kasvukauden vaiheen vaikutus näkyi molemmissa lasketuissa REIP-arvoissa, mikä vahvistaa punaisen reunan merkitystä aikaseurannassa.



Kuva 36 Haavan punaisen reunan derivaattaspekttrin kehitys kasvukauden aikana

## 5 Johtopäätökset

Tarve tarkalle ja luotettavalle lehti- ja neulastason spektriaineistolle on kiistaton. Boreaalisen vyöhykkeen puulajien spektrimittauksissa on ollut suuria puutteita erityisesti havupuuden osalta, mikä selittyy haasteilla yksittäisten neulasten mittauksessa. Diplomityössä onnistuttiin keräämään kattava spektriaineisto 13:sta lehtipuulajista ja 12:sta havupuulajista. Näytteet kerättiin sekä latvuston valolle altistuvasta osasta että varjosta. Lisäksi työssä tutkittiin lehtien ja neulasten puolierojen, kasvukauden vaiheen ja neulasvuosikerran vaikutusta heijastus-, läpäisy- ja albedospektreihin. Mittauskampanjassa käytettiin erillisiä mittalaitteita lehti- ja neulasnäytteille. Kaksoisintegroiva pallo (SpectroClip) osoittautui luotettavaksi ja yksittäiseen integroivaan palloon verrattuna ylivoimaisen nopeaksi tavaksi mitata heijastus- ja läpäisy-spektrejä. Menetelmän kehittäminen neulasmittauksille nopeuttaisi spektrietokantojen keruuta entisestään. Menetelmien vertailukelpoisuusongelmista huolimatta aineisto on hyvin laaja verrattuna olemassa oleviin tietokantoihin ja mittaukset sisäisesti vertailukelpoisia.

Puulaji ja -suku selittivät merkittävän osan spektrien varianssista. Puulajit erosivat eniten SWIR-alueen albedoissa, jossa maksimiselitysasteet olivat havupuilla 0,78 ja lehtipuilla 0,62. Havupuulajin korkeampaa selitystasetta saattaa selittää suuremmat muoto- ja rakennerot lajien välillä. Kesävihannoivien lehtikuusten (*Larix*) spektrit muistuttivat läheisesti lehtipuuden spektrejä. Lehden tai neulasen puolen vaikutus spektreihin korostui lehtipuilla VIS-alueella, missä abaksiaalisen puolen albedo oli adaksiaalista puolta korkeampi. Havupuilla vastaava ilmiö oli yleisesti heikompi, mutta korostui *Abies*-suvun näytteissä. Latvuston valo-olosuhteiden vaikutus todettiin pieneksi, mutta yhtä suureksi lehti- ja havupuilla. Ero oli suurimmillaan SWIR-alueella, missä varjonäytteiden albedo oli suoralle valolle altistuvia näytteitä suurempi. Vaikutus näkyi erityisesti transmittanssissa, mitä selittävät valo- ja varjonäytteiden paksuuserot. Paksuuden voidaan olettaa vaikuttavan myös neulasvuosikertojen spektreihin. Tutkimuksessa huomattiin ensimmäisen vuosikerran korkeampi transmittanssi NIR- ja SWIR-alueilla. Lisäksi vuosikerrat erosivat selvästi vihreän valon alueella, missä toisen vuosikerran absorptio oli ensimmäistä vuosikertaa korkeampi. Kasvukauden vaihe näkyi selvästi mitatuista koivun ja haavan spektreistä. VIS-alueen albedosta erottui kolme vaihetta: kevään matalan absorptioon vaihe, kesä-elokuun stabiili, korkean absorptioon vaihe sekä syksyn kolmas vaihe, kun lehden kellastuessa näkyvän valon absorptio laskee nopeasti kevään tasolle. SWIR-alueella albedo laski läpi kasvukauden.

Tulokset vahvistavat lyhytaaltoisen infrapunan (SWIR) merkitystä lehti- ja neulastason spektroskopiassa. SWIR-alueen merkitys korostui lajierojen tulkinnassa ja erityisesti kaukokartoituksen kannalta mielenkiintoisessa albedossa. Myös latvuston valo-olosuhteiden, näytteen puolen, neulasvuosikerran ja kasvukauden vaiheen huomattiin vaikuttavan mitattuihin SWIR-spektreihin. Spektrometriksen kehityksen vuoksi SWIR-alueen käyttö spektriaineistojen keruussa on lisääntynyt vasta viime vuosikymmenen aikana, mikä rajoittaa vertailutulosten määrää ja siten johtopäätösten tekemistä SWIR-alueen havainnoista. Diplomityössä käytetyt menetelmät ja poikkeuksellisen laaja aineisto osoittavat kuitenkin SWIR-alueen suuren merkityksen kasvillisuuden spektroskopiassa.

Kanavien väliset korrelaatiot paljastivat aallonpituuksien jakautuneen kolmeen ryhmään, jotka vastasivat hyvin alueita VIS, NIR ja SWIR. Kunkin alueen sisällä spektriin vaikuttavat samat tekijät: VIS-alueella pigmentit, NIR-alueella pinnan ominaisuudet sekä sisäinen rakenne ja SWIR-alueella sisäinen rakenne ja vesi. Olikin usein perusteltua olettaa spektrierojen selittyvän klorofyllipitoisuus- ja paksuusvaihteluilla. Korrelaatiotutkimus osoitti kapean

punaisen reunan alueen matalan korrelaation edellä mainittujen ryhmien kanssa. Kapeat uniikisti käyttäytyvät aallonpituusalueet korostavat monikanavainstrumenttien tarpeellisuutta kaukokartoituksessa. Albedon punaisen reunan käännepisteen sijaintiin (REIP) vaikuttivat eniten lehtinäytteiden puoli ( $R^2 = 0,75$ ), havupuulaji ( $R^2 = 0,61$ ) ja mittausajankohta ( $R^2 = 0,61$ ). Diplomityössä esitetyt menetelmät REIP-arvojen ratkaisuksi tarjosivat laskennallisesti kevyen tavan tulkita kasvillisuuden hyperspektriaineistoa. Kehittyneemmiltä laskentatavoilta, jotka huomioivat esimerkiksi derivaattaspektrin jyrkkyyden ja monihuippuisuuden, voidaan odottaa entistä tarkempia tuloksia. Laskettujen REIP1- ja REIP2-arvojen samankaltaisuus vahvistaa kuitenkin saatujen tulosten luotettavuutta.

Vaikka puulajilla ja muilla tekijöillä huomattiin olevan tilastollinen merkitsevyys laboratoriossa mitattuihin spektreihin, mitatut tasoerot olivat kuitenkin pieniä suhteessa näyteotannan monimuotoisuuteen. Tutkimus nosti esiin uusia kysymyksiä siitä, miten puulajien ja muiden tekijöiden väliset erot näkyvät kaukokartoitusinstrumenteilla, kun käytetyt aallonpituuskaistat ovat leveämpiä ja kasvillisuuden rakenne monimutkaisempi. Diplomityön tuloksena syntynyt spektrikirjasto on maailman laajin boreaalisia puulajeja kattava tietokanta, joka on tarjolla kaikille kaukokartoitusmenetelmien kehittäjille avoimessa, kansainvälisessä SPECCHIO-tietokannassa.

## Lähteet

- Aasen, H., Burkart, A., Bolten, A., Bareth, G. (2015) Generating 3D hyperspectral information with lightweight UAV snapshot cameras for vegetation monitoring: From camera calibration to quality assurance. *Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. 108. S. 245–259. ISSN: 09242716
- Alonzo, M., Bookhagen, B., Roberts, D.A. (2014) Urban tree species mapping using hyperspectral and lidar data fusion. *Remote Sensing of Environment*. 148. S. 70–83. ISSN: 00344257
- ASD-manuaali. Valmistajan kotisivut. <http://support.asdi.com/Document/Documents.aspx>
- Boyer, M., Miller, J., Belanger, M., Hare, E., Wu, J. (1988) Senescence and spectral reflectance in leaves of northern pin oak (*Quercus palustris* Muenchh.). *Remote Sensing of Environment*. 25. S. 71–87. ISSN: 00344257
- Brakke, T.W., Wergin, W.P., Erbe, E.F., Harnden, J.M. (1993) Seasonal variation in the structure and red reflectance of leaves from yellow poplar, Red Oak, and Red Maple. *Remote Sensing of Environment*. 43. S. 115–130. ISSN: 00344257
- Carr, K.F. (1997) Integrating sphere theory and applications part II: Integrating sphere applications. *JOCCA - Surface Coatings International*. 80. S. 485–490. ISSN: 13560751
- Castro, K.L., Sanchez-Azofeifa, G.A. (2008) Changes in spectral properties, chlorophyll content and internal mesophyll structure of senescing *Populus balsamifera* and *Populus tremuloides* leaves. *Sensors*. 8. S. 51–69. ISSN: 14243210
- Cho, M.A., Skidmore, A.K. (2006) A new technique for extracting the red edge position from hyperspectral data: the linear extrapolation method. *Remote Sensing of Environment*. 101. S. 181–193. ISSN 0034-4257
- Daughtry, C.S.T., Biehl, L.L. (1985) Changes in spectral properties of detached birch leaves. *Remote Sensing of Environment*. 17. S. 281–289. ISSN: 00344257
- Daughtry, C.S.T., Biehl, L.L., Ranson, K.J. (1989) A new technique to measure the spectral properties of conifer needles. *Remote Sensing of Environment*. 27. S. 81–91. ISSN: 00344257
- Demarez, V., Gastellu-Etchegorry, J.P., Mougin, E., Marty, G., Proisy, C., Dufrêne, E., Dantec, V.L. (1999) Seasonal variation of leaf chlorophyll content of a temperate forest. Inversion of the PROSPECT model. *International Journal of Remote Sensing*. 20. S. 879–894. ISSN: 01431161
- Disney M., Lewis P., Saich P. (2006) 3D modelling of forest canopy structure for remote sensing simulations in the optical and microwave domains. *Remote Sensing of Environment*. 100. S. 114–132. ISSN: 00344257
- Gausman, H.W., Allen, W.A., Cardenas, R. (1969) Reflectance of cotton leaves and their structure. *Remote Sensing of Environment*. 1. S. 19–22. ISSN: 00344257

- Gausman, H. W., Allen, W.A. (1973). Optical Parameters of Leaves of 30 Plant Species. *Plant physiology*. 52. S. 57-62. DOI: 10.1104
- Gausman, H.W. (1984) Evaluation of factors causing reflectance differences between Sun and Shade Leaves. *Remote Sensing of Environment*. 15. S. 177-181. ISSN: 00344257
- Gitelson, A.A., Merzlyak, M.N., Lichtenthaler, H.K. (1996) Detection of red edge position and chlorophyll content by reflectance measurements near 700 nm. *Journal of Plant Physiology*. 148. S.501–508. ISSN: 01761617
- Goebel, D.G. (1967) Generalized integrating-sphere theory. *Applied Optics*. 6. S. 125–128. ISSN: 1559128X
- Guanter, L., Segl, K., Foerster, S., Hollstein, A., Rossner, G., Chlebek, C., Storch, T., Heiden, U., Mueller, A., Muller, R., Sang, B. (2016) Overview of the EnMAP imaging spectroscopy mission. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. Artikkelin nro. 7729059. S. 261-263. ISBN: 978-150903332-4
- Hynynen, J., Repola, J., Mielikäinen, K. (2011) The effects of species mixture on the growth and yield of mid-rotation mixed stands of Scots pine and silver birch. *Forest Ecology and Management*. 262. S. 1174–1183. ISSN: 03781127
- Jääskeläinen, T., Silvennoinen, R., Hiltunen, J. (1994) Classification of the reflectance spectra of pine, spruce, and birch. *Applied Optics*. 33. S. 2356–2362. ISSN: 1559128X
- Knapp, A. K., Carter, G. A. (1998) Variability in leaf optical properties among 26 species from a broad range of habitats. *American Journal of Botany*. 85. S. 940–946. ISSN: 00029122
- Labsphere-manuaali. Valmistajan kotisivut. <https://www.labsphere.com/site/assets/files/2553/a-guide-to-reflectance-materials-and-coatings.pdf>
- Lhotáková, Z., Albrechtová, J., Malenovský, Z., Rock, B., Polák, T., Cudlín, P. (2007). Does the azimuth orientation of Norway spruce (*Picea abies*/L./Karst.) branches within sunlit crown part influence the heterogeneity of biochemical, structural and spectral characteristics of needles? *Environmental and Experimental Botany*. 59. S. 283–292. ISSN: 0098-8472
- Loizzo, R., Ananasso, C., Guarini, R., Lopinto, E., Candela, L., Pisani, A.R. (2016) The PRISMA hyperspectral mission. European Space Agency (Special Publication). SP-740. ISSN: 03796566
- Lukeš, P., Stenberg, P., Rautiainen, M., Möttus, M., Vanhatalo, K.M. (2013) Optical properties of leaves and needles for boreal tree species in Europe. *Remote Sensing Letters*. 4. S. 667–676. ISSN: 2150704X
- Mesarch, M.A., Walter-Shea, E.A., Asner, G.P., Middleton, E.M., Chan, S.S. (1999) A revised measurement methodology for conifer needles spectral optical properties: Evaluating the influence of gaps between elements. *Remote Sensing of Environment*. 68. S. 177–192. ISSN: 00344257
- Möttus, M., Sulev, M., Hallik, L. (2014) Seasonal course of the spectral properties of alder and birch leaves. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 7. S. 2496–2505. ISSN: 2150704X

- Möttus, M., Hovi, A., Rautiainen, M. (2017) Theoretical algorithm and application of a double-integrating sphere system for measuring leaf transmittance and reflectance spectra. *Applied Optics*. 56. S. 563–571. ISSN: 1559128X
- Noda, H.M., Motohka, T., Murakami, K., Muraoka H., Nasahara K.N. (2014) Reflectance and transmittance spectra of leaves and shoots of 22 vascular plant species and reflectance spectra of trunks and branches of 12 tree species in Japan. *Ecological Research*. 29. S. 111–111. DOI: 10.1007/s11284-013-1096-z
- O'Neill, A.L., Kupiec, J.A., Curran, P.J. (2002) Biochemical and reflectance variation throughout a sitka spruce canopy. *Remote Sensing of Environment*. 80., S. 134–142. ISSN: 00344257
- Otsu, N. (1979) A Threshold Selection Method from Gray-Level Histograms. *Transactions on Systems, Man, and Cybernetics*. 9. S.62–66. ISSN: 00189472
- Pickering, J.W., Moes, C.J.M., Sterenborg, H.J.C.M., Prahl, S.A., Van Gemert, M.J.C. (1992) Two integrating spheres with an intervening scattering sample. *Journal of the Optical Society of America A: Optics and Image Science, and Vision*. 4. S. 621–631. ISSN: 00344257
- Price J.C. (1994) How Unique Are Spectral Signatures? *Remote Sensing of Environment* 49. S.181–186. ISSN: 00344257
- Rautiainen M., Möttus M., Heiskanen J., Akujärvi A., Majasalmi T., Stenberg P. (2011) Seasonal reflectance dynamics of common understory types in a northern European boreal forest. *Remote Sensing of Environment*. 115. S. 3020–3028. ISSN: 00344257
- Roth, K.L., Casas, A., Huesca, M., Ustin, S.L., Alsina, M.M., Mathews, S.A., Whiting, M.L., (2016) Leaf spectral clusters as potential optical leaf functional types within California ecosystems. *Remote Sensing of Environment*. 184. S. 229–246. ISSN: 00344257
- Ruffin, C., King, R.L. (1999) Analysis of hyperspectral data using Savitzky-Golay filtering - theoretical basis (Part 1) [Konferenssiartikkeli]. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium*. 2. S. 756–758.
- Savitzky, A., Golay, M.J.E. (1964) Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures. *Analytical Chemistry*. 36. S. 1627–1639. ISSN: 00032700
- Schaepman-Strub, G., Schaepman, M.E., Painter, T.H., Dangel, S., Martonchik, J.V. (2006) Reflectance quantities in optical remote sensing-definitions and case studies. *Remote Sensing of Environment*. 103. S. 27–42. ISSN: 00344257
- Torresan, C., Berton, A., Carotenuto, F., Di Gennaro, S.F., Gioli, B., Matese, A., Miglietta, F., Vagnoli, C., Zaldei, A., Wallace, L. (2017) Forestry applications of UAVs in Europe: a review. *International Journal of Remote Sensing*. 38. S. 2427-2447. ISSN: 01431161
- Yanez-Rausell, L., Schaepman, M.E., Clevers, J.G.P.W., Malenovsky, Z. (2014) Minimizing measurement uncertainties of coniferous needle-leaf optical properties, part i: Methodological review. *Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. 7. S. 399–405. ISSN: 19391404