

Venla Reponen

# DATAN LAADUN ARVIOIMINEN MET- SIEN HIILINIELUMITTAUKSISSA

Kandidaatintutkielma  
Johtamisen ja talouden tiedekunta  
Tarkastaja: Osku Torro  
Joulukuu 2023

# TIIVISTELMÄ

Venla Reponen: Datan laadun arvioiminen metsien hiilinielumittauksissa  
Kandidaatintutkielma  
Tampereen yliopisto  
Tietojohdamisen tutkinto-ohjelma  
Joulukuu 2023

---

Tutkimus keskittyy metsien hiilinielujen mittausten menetelmiin ja niiden tuottaman datan laadun arviointiin. Tutkimuksen lähtökohtana on Suomen metsien rooli globaalissa hiilinielussa. Suomen metsät kattavat yli 75 % maan pinta-alasta ja ovat osa boreaalista havumetsävyöhykettä. Metsät tarjoavat monipuolisia ekologisia palveluita, kuten hiilidioksidin sitomista, mikä on tärkeää ilmastomuutoksen hillitsemisessä. Tutkimuksen päätavoitteena on selvittää, miten eri hiilinielujen mittausten menetelmien tuottaman datan laatua voidaan parantaa ja miten tämä datan laatu vaikuttaa päätöksentekotilanteisiin.

Tutkimus toteutettiin kirjallisuuskatsauksena mukailien Finkin mallia systemaattisesta kirjallisuuskatsauksesta. Tärkeimmät tietokannat, joista aineistoa kerättiin, olivat Andor, Scopus ja ScienceDirect. Finkin mallista poiketen näiden tietokantojen lisäksi hyödynnettiin myös ei-tieteellisiä tietokantoja kuten Luonnonvarakeskuksen ja Maa- ja metsätalousministeriön sivustoja. Tutkimuksen keskeisimpiä käsitteitä ovat hiilinielumittausmenetelmät, datan laatu ja päätöksenteko. Tutkimuksessa esitellään neljä menetelmää: metsien inventaariot, kaukokartoitusteknologiat, pyörrekovarianssimenetelmä ja käänteismenetelmä, joilla hiilinielujen mittaamista voidaan suorittaa metsäympäristöissä. Tämän jälkeen tutkitaan datan laatua Cain ja Zhun teoreettisen mallin avulla. Lopuksi kirjallisuuden perusteella tutkitaan datan laatuun liittyviä heikkouksia eri hiilinielumittausmenetelmien kohdalla.

Tutkimuksen tulokset osoittavat, että hiilinieluja mitattaessa tutkimuksessa käsiteltyjen neljän eri menetelmän välillä on eroja tuotetun datan laadussa. Tutkimuksessa hyödynnetyn mallin mukaan hiilinieluista saatavissa mittauksissa voi olla ongelmia datan luotettavuuden, saatavuuden ja merkityksellisyyden suhteen. Luotettavuudessa on ongelmia kaikissa mittausmenetelmissä. Metsien inventaariot ovat luotettavia, jos inventaarioita suorittavat yksilöt ovat päteviä. Kaukokartoitusteknologioilla mitattu data on luotettavaa tietyissä olosuhteissa. Pyörrekovarianssimenetelmällä mitattu data kärsii menetelmän systemaattisista virheistä. Käänteismenetelmän tulokset perustuvat epäsuoriin mittauksiin, ja menetelmästä saatavan datan laatu riippuu käytettyjen aineistojen sopivuudesta. Mittauksissa on myös muita ongelmia, jotka vaikuttavat tuotetun datan laatuun negatiivisesti. Tuloksien mukaan hiilinieluista saatavan datan laatua voidaan parantaa esimerkiksi hyödyntämällä useita mittausmenetelmiä yhdessä ja lisäämällä mittausverkostojen mittauspisteiden määrää erilaisissa metsäympäristöissä. Tuloksissa myös korostetaan datan laadun merkitystä tehokkaalle päätöksenteolle ja ympäristöpolitiikalle.

Avainsanat: datan laatu, metsien hiilinielu, hiilinielumittausmenetelmät, päätöksenteko

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin Originality Check -ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty kirjallisuuskatsauksena Tampereen yliopiston tietojohdamisen tutkiminto-ohjelmaan syksyllä 2023. Aiheeksi valikoituivat metsien hiilinielut, koska halusin tehdä tutkimusta omien kiinnostuksen kohteiden kanssa ja toivonkin tulevaisuudessa voivani työllistyä kyseisen aiheen pariin. Tietojohdamisen osalta pääsin tutustumaan datan laadun arvioimiseen syvemmin sekä sen vaikutuksiin päätöksentekoprosesseille, mikä myös kiinnosti minua.

Haluan kiittää kandidaatintyön ohjaajaani Osku Torroa, joka on tutkimuksen alusta loppuun asti ollut innostava ja aidosti kiinnostunut työstäni sekä tukenut tutkimuksen tekemistä. Tämän lisäksi haluan kiittää ystäviäni ja läheisiäni, jotka ovat kuunnelleet kärsivällisesti ideoitani ja murheitani tähän tutkimukseen liittyen ja tarjonneet kannustavia sanoja sekä neuvoja. Erityiskiitoksen heistä ansaitsevat Viliina Huttunen sekä Niina Pekkanen.

Tampereella, 15.12.2023

Venla Reponen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
1.1 Tutkimuksen tausta ja merkitys .....	1
1.2 Tutkimusongelma ja aiheen rajaus .....	2
1.3 Tutkimuksen rakenne .....	2
2. TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO .....	4
2.1 Tutkimusmenetelmä .....	4
2.2 Tutkimusaineisto .....	4
3. HIILINIELUJEN MITTAAMINEN ERI MENETELMILLÄ .....	6
3.1 Hiilinielujen mittaaminen .....	6
3.2 Metsien inventaariot .....	7
3.3 Kaukokartoitusteknologiat .....	8
3.4 Pyörrekovarianssimenetelmä .....	9
3.5 Käänteismenetelmä .....	9
4. DATAN LAATU .....	10
4.1 Datan laadun määrittäminen .....	10
4.2 Datan laadun dimensiot .....	10
4.2.1 Saatavuus .....	11
4.2.2 Käytettävyys .....	11
4.2.3 Luotettavuus .....	11
4.2.4 Merkityksellisyys .....	11
4.2.5 Esitettävyys .....	11
4.3 Datan laadun merkitys päätöksenteolle .....	12
5. DATAN LAADUN PARANTAMINEN HIILINIELUMITTAUKSISSA .....	13
5.1 Datan laatu erilaisissa hiilinielumittauksissa .....	13
5.1.1 Metsien inventaarioiden datan laatu .....	13
5.1.2 Kaukokartoitusteknologioiden datan laatu .....	14
5.1.3 Pyörrekovarianssimenetelmän datan laatu .....	14
5.1.4 Käänteismenetelmän datan laatu .....	15
5.2 Mittausten datan laadun parantaminen .....	15
5.3 Päätöksenteon tukeminen .....	16
6. PÄÄTELMÄT .....	18
6.1 Tutkimuksen tulokset .....	18
6.2 Tuloksien arviointi .....	19
6.3 Jatkotutkimusehdotukset .....	19
LÄHTEET .....	21

# 1. JOHDANTO

Tämän tutkimuksen tarkoituksena on selvittää kirjallisuuskatseuksen keinoin, miten eri metsien hiilinielujen mittausten menetelmillä mitatun datan laatua voidaan parantaa. Lisäksi pohditaan, mikä on laadukkaan datan merkitys päätöksentekoprosessille.

## 1.1 Tutkimuksen tausta ja merkitys

Suomen maa-alasta metsää on yli 75 % ja siitä valtaosa kuuluu boreaaliseen havumetsävyöhykkeeseen (Saastamoinen et al., 2014, s. 26). Metsien tarjoamia ekologisiasiapalveluja hyödynnetään Suomessa monilla tavoilla. Tuotantopalveluina saadaan esimerkiksi biomassaa (Saastamoinen et al., 2014, s. 46). Metsien merkitys Suomen taloudelle on suuri, sillä tavaraviennistä ulkomaille metsäteollisuuden osuus vuonna 2022 oli noin 18 % (Maa- ja metsätalousministeriö). Metsistä saadaan kulttuuripalveluita, kuten luontomatkailun miljöö, inspiraatiota taiteelle ja metsien avulla voidaan toteuttaa opetusta ja tutkimusta (Saastamoinen et al., 2014).

Edellä mainittujen lisäksi metsät tuottavat paljon säätely- ja ylläpitopalveluita, kuten hiilidioksidin sitominen ilmakehästä, haitta-aineiden varastoiminen ja pölytys pölyttäjähöynteis populaatioiden avulla (Saastamoinen et al., 2014, s. 52–56). Näistä tässä tutkimuksessa keskitytään hiilensidontaan. Metsillä on kyky sitoa hiilidioksidia ilmakehästä ja vaikuttaakin siltä, että metsien ja metsämaiden tarkoituksenmukaisella käytöllä metsien kykyä sitoa hiilidioksidia voidaan vahvistaa (Ippc, 2022, s. 146). Voitaneen siis todeta, että metsillä on merkitystä niin Suomelle valtiona kuin suomalaisille, mutta myös koko maapallolle ja ihmiskunnalle.

Metsien hyödyntämistä Suomessa rajataan lainsäädännön avulla. Metsien käyttöä, kasvatusta, hakkuita ja monimuotoisuuden turvaamista säädetään metsälain avulla (Metsälaki 1093/1996). Metsien käytön suunnittelu ei rajaudu yksistään Suomen lakiin. Suomea koskevat lisäksi Euroopan unionin päätökset. Euroopan parlamentti (2017) toteaa sivustoillaan, että EU on asettanut tavoitteekseen olla hiilineutraali vuoteen 2050 mennessä. Yksi tärkeä osa tätä tavoitetta on kasvattaa hiilinielujen määrää EU:n alueella. Metsät sitovat 7 % EU:n kasvihuonepäästöistä vuosittain. (Euroopan parlamentti, 2017)

Maaperään orgaanisesti sitoutuneen hiilidioksidin määrään vaikuttavat muun muassa ilmasto, ilmaston muuttuminen, maankäyttö ja maaperän laatu. Ei kuitenkaan ole tarkkaa tietoa, kuinka ja kuinka paljon nämä asiat vaikuttavat hiilen varastoitumiseen. Erityisesti lyhyellä aikavälillä hiilinielujen ko'issa on vaikeaa havaita muutoksia. Tämä vaikeuttaa hiilinielujen seurantaa, raportointia ja vahvistamista. (Smith et al., 2020) Jos hiilinieluja ei voida seurata ja niistä saatavan

datan laadusta ei ole tietoa, päätöksentekoa kansallisella eikä kansainvälisellä tasolla voida perustaa luotettavaan tietoon. Päätöksenteon laatua edistää, että ympäristöstä saatavia tietoja yhdistetään taloudesta saataviin tietoihin (Vardon et al., 2018, s. 83).

## 1.2 Tutkimusongelma ja aiheen rajaus

Tutkimuksen aiheena on metsien hiilinieluista saatavan datan laadun parantaminen. Maapallolla on paljon erilaisia metsiä ja kasvillisuuksia, mitkä riippuvat muun muassa paikallisesta ilmastosta (McCull, 2014, s. 957). Tässä tutkimuksessa hiilinielujen mittaamista käsitellään yleisesti metsissä eikä keskitytä mihinkään yksittäiseen metsä- tai kasvillisuustyyppiin. Kuitenkin tutkimuksen näkökulma on suomalainen metsäpolitiikka ja metsien käyttö. Näin ollen päätutkimuskysymys on seuraava:

- Kuinka hiilinieluista mitatun datan laatua voidaan parantaa?

Datan laadun parantamiseksi halutaan selvittää, mitä ovat yleisimmät tavat, joilla hiilinieluja voidaan mitata ja kuinka nämä mittausten menetelmät toimivat. Tämän lisäksi pohditaan, mitä ongelmia esiintyy datan laadussa eri menetelmillä suoritettavilla mittauksilla. Näin ollen alatutkimuskysymykset ovat tässä:

- Miten metsien hiilinieluja mitataan?
- Mitä ongelmia hiilinielumittauksissa saatavassa datassa on laadun kannalta?

Aihetta käsitellään päätöksenteon tukemisen näkökulmasta. Tutkimuksessa tullaan tarkastelemaan hiilinielujen mittauksia ja datan laadun merkitystä päätöksenteon kautta.

## 1.3 Tutkimuksen rakenne

Tutkimus on jaettu kuuteen päälukuun, jotka edelleen jakautuvat alalukuihin sekä mahdollisesti myös näiden alalukuihin. Ensimmäisessä luvussa esitellään tutkimuksen aihe, aiheen rajaaminen sekä tutkimuskysymykset, joihin haetaan vastauksia. Toisessa luvussa käydään läpi menetelmä, jolla tutkimus tullaan toteuttamaan sekä minkälaisia aineistoja tullaan käyttämään.

Kolmannessa luvussa tutkitaan, kuinka metsien hiilinieluja voidaan mitata. Alaluvuissa käsitellään hiilinielujen mittaamista yleisellä tasolla sekä neljän eri menetelmän avulla. Jokaiselle menetelmälle: metsien inventaariot, kaukokartoitusteknologiat, pyörrekovarianssimenetelmä sekä käänteismenetelmä on omat alalukunsa. Näissä alaluvuissa tutustutaan jokaisen menetelmän ominaispiirteisiin, joihin hiilinielujen mittaaminen perustuu.

Neljännessä luvussa syvennytään datan laatuun. Alaluvuissa määritellään, mitä laadulla ja datan laadulla tässä tutkimuksessa tarkoitetaan. Näiden lisäksi esitellään malli, joka jakaa datan laadun arvioinnin viiteen eri dimensioon ja näiden alakohtiin. Datan laadun viisi dimensiota ja osa niiden alakohdista esitellään omissa alaluvuissa. Lisäksi neljännessä luvussa sivutaan myös datan laadun merkitystä päätöksenteolle.

Viidennessä luvussa yhdistellään luvuissa kolme ja neljä löydettyjä asioita. Eri hiilinielujen mittausmenetelmistä saatavaa dataa arvioidaan luvussa neljä esitettyjen datan laadun määritelmien avulla. Jokainen mittausmenetelmä käsitellään erikseen, sille ominaisten datan laadun ongelmien kautta. Tämän jälkeen tutkitaan, miten datan laatua voitaisiin parantaa näissä eri mittausmenetelmissä. Lopuksi vielä pohditaan, mitä vaikutuksia datan laadulla on päätöksenteon tukemiselle.

Lopuksi luvussa kuusi tehdään yhteenveto aikaisemmissa luvuissa tutkituista asioista. Tutkimuksen tulokset esitellään sekä arvioidaan, kuinka hyvin ne vastasivat alussa määritettyihin tutkimuskysymyksiin. Lopuksi esitellään mahdollisia jatkotutkimusehdotuksia, joiden suuntaan tulevaisuudessa tutkimusta voidaan jatkaa.

## 2. TUTKIMUSMENETELMÄ JA -AINEISTO

Tässä luvussa esitellään, kuinka tutkimus on käytännössä toteutettu. Ensin kerrotaan, millä menetelmillä aineistoa on kerätty ja miten sitä on analysoitu. Lopuksi esitellään tutkimuksen kannalta olennaisimmat aineistot.

### 2.1 Tutkimusmenetelmä

Tutkimus toteutetaan kirjallisuuskatsauksena. Finkin (2019) mukaan kirjallisuuskatsaus on systemaattinen, täsmällinen ja toistettava menetelmä, jolla voidaan tunnistaa, arvioida ja yhdistellä tutkijoiden töitä ja niiden tuloksia. Tutkimusaineistoksi laadukkaiden ja alkuperäisten lähteiden valitseminen on tärkeää, koska tällöin tutkimuksen tulokset ovat tarkempia ja parempia. Kirjallisuuskatsaus toteutetaan seuraavia seitsemää vaihetta mukaillen:

1. tutkimuskysymyksiä asettaminen
2. tietokantojen valitseminen
3. hakusanojen valitseminen
4. aineiston rajaaminen käytännön kriteereillä
5. aineiston rajaaminen metodologisilla kriteereillä
6. katsauksen toteuttaminen
7. tuloksien yhdisteleminen. (Fink, 2019, s. 6–7)

Tässä tutkimuksessa tutkimuskysymykset on asetettu luvussa 1.2. Tutkimuksella on yksi päätutkimuskysymys sekä kaksi alatutkimuskysymystä, joiden avulla pyritään tukemaan päätutkimuskysymykseen vastaamista. Tietokantojen sekä hakusanojen valinnasta kerrotaan luvussa 2.2. Kyseisessä luvussa perustellaan, miksi tiettyjä tietokantoja on päädytty hyödyntämään, sekä mitä olennaisimmat hakusanat ovat olleet, joilla tietoa on kerätty. Periaatteet, joiden mukaan aineistoa on rajattu sekä käytännön että metodologisilla kriteereillä, ovat esiteltynä myös luvussa 2.2. Varsinainen kirjallisuuskatsauksen toteuttaminen tapahtuu pääosin luvuissa kolme ja neljä. Tuloksien yhdistelemistä tehdään luvussa viisi.

### 2.2 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineistoa on kerätty pääasiassa seuraavista tietokannoista: Andor, Scopus ja Science Direct. Myös Google Scholaria on käytetty aineiston etsimiseen, mutta ei yhtä paljoa. Kolmesta ensimmäisestä tietokannasta Andoria on hyödynnetty eniten. Google Scholaria ei suosittu ensisijaisena tietokantana lähteiden etsintään, koska sen kautta löydettyjen lähteiden laatu voi vaihdella erityisen paljon. Kirjallisuuskatsausta toteuttaessa pyrittiin valitsemaan mahdollisimman luotettavia lähteitä, jotta tuloksetkin olisivat luotettavampia. Tietokantojen lisäksi aineistoa on etsitty



myös alan lehdistä kuten Science, Nature ja Forest policy and economics. Näitä lehtiä on hyödynnetty tietokantoina erityisesti silloin, kun tutkimuksen teemoja on käsitelty nimenomaan metsien hiilinielujen näkökulmasta eikä esimerkiksi yleisesti datan laadusta. Tieteellisten tietokantojen ja lehtien lisäksi aineistoa on etsitty myös kansallisten toimijoiden kautta. Esimerkiksi Maa- ja metsätalousministeriö ja Luonnonvarakeskus julkaisevat sivuillaan Suomen metsien käyttöön liittyvää tietoa.

Metsien hiilinielujen mittaamiseen liittyvää aineistoa on haettu useilla hakusanoilla, kuten "measurement", "carbon sequestration", "forest carbon" ja "monitoring". Hiilinielujen eri mittaussmenetelmiin liittyviä hakutermejä ovat "(forest) inventory", "remote sensing (technology)", "lidar", "radar", "eddy covariance" ja "inverse method". Datan laatuun liittyä hakutermejä ovat olleet "data quality", "data quality management" ja "data quality assessment". Päätöksenteon tukemiseen liittyvää aineisto on etsitty muun muassa seuraavien termien avulla: "decision making" ja "decision support system". Hakusanoja on yhdistelty monipuolisesti, kun pyrittiin löytämään mahdollisimman osuvia lähteitä.

Aineiston määrää on rajattu käytännön kriteereillä. Aineistoa valittaessa on pyritty valitsemaan melko uusia lähteitä. Hiilinielujen mittaamisessa hyödynnettävät teknologiat kehittyvät, joten reilusti yli kymmenen vuotta vanhoja lähteitä ei pidetty tätä kirjallisuuskatsausta tehtäessä lähtökohdaisesti riittävän ajankohtaisina. Metodologista rajaamista on tehty, kun aineistoa valitessa on pyritty hyödyntämään vertaisarvioituja artikkeleita niiden laadun varmistamiseksi.

Tässä kirjallisuuskatsauksessa käytetyn aineiston pohjalta luodaan kokonaisuus, joka kuvaa miten metsien hiilinielujen mittaussmenetelmiä voitaisiin kehittää mittauksista saatavan datan laadun parantamiseksi. Seuraavaksi esitellään kirjallisuuskatsauksen aineiston olennaisimmat lähteet:

- Zhang, X., Zhao, Y., Ashton, M. & Lee, X. (2012) Measuring Carbon in Forests.

Luku kirjasta Managing Forest Carbon in a Changing Climate, missä esitellään neljä yleistä menetelmää, joilla metsien hiilinieluja voidaan mitata. Kyseisessä kirjan luvussa esitellään eri menetelmien toimintaperiaatteet sekä niihin liittyviä rajoituksia, mutta myös ehdotuksia mittaussmenetelmien kehittämiseksi.

- Cai, L. & Zhu, Y. (2015) The Challenges of Data Quality Assessment in the Big Data Era.

Konferenssiartikkeli datan laadun arvioimisesta. Artikkelin mallissa esitellään useita dimensioita, joiden avulla voidaan tutkia, kuinka laadukasta data on. Ajatuksena on, että esimerkiksi datan tarkkuus eli kuinka hyvin data kuvaa todellisuutta ei riitä yksistään määrittämään datan laatua, vaikka onkin yksi laadun kriteereistä.

## 3. HIILINIELUJEN MITTAAMINEN ERI MENETELMILLÄ

Tästä kappaleesta alkaa tämän tutkimuksen teoriaosuuksien käsittely. Aluksi esitellään metsien hiilinielujen mittaamisen merkitystä. Sitten käydään läpi neljä yleisiä menetelmiä, joilla metsien hiilinieluja voidaan mitata.

### 3.1 Hiilinielujen mittaaminen

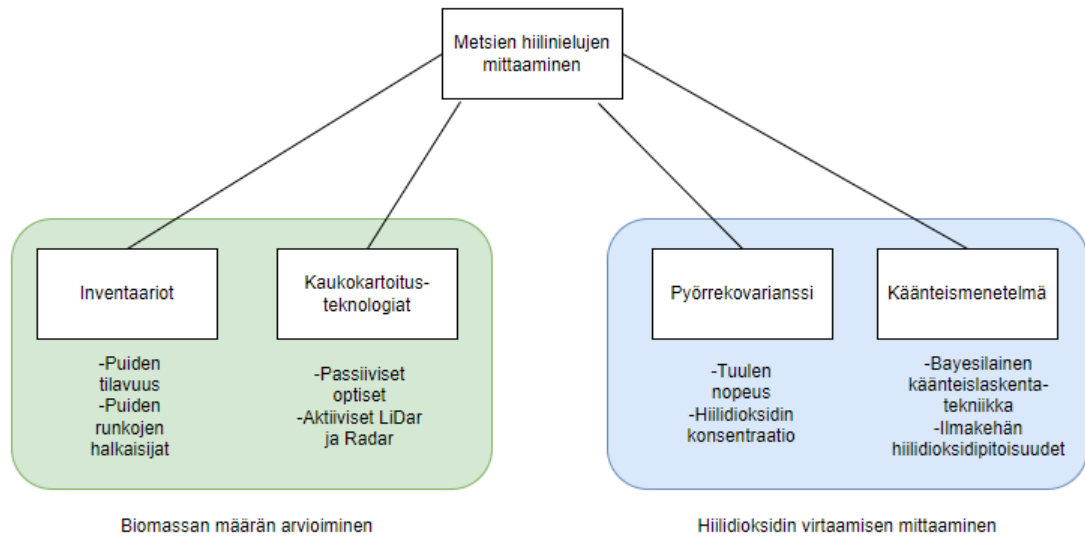
Maailman laajuisista hiilidioksidi päästöistä jopa 20 % on arvioitu johtuvan metsäkadosta sekä metsien tilan heikkenemisestä (Petrokofsky et al., 2011 s. 57). Metsäkadolla tarkoitetaan tilannetta, jossa luonnontilaista metsää muokataan tai hakataan esimerkiksi maatalouskäyttöön (Brown & Zarin, 2013). REDD ja REDD+ ovat Yhdistyneiden kansakuntien Kioton ilmastosopimuksen osia, jotka tähtäävät päästöjen vähentämiseen metsäkadon pysäyttämällä sekä metsien tilan parantamisella (Petrokofsky et al., 2011 s. 57). Monet valtiot ovatkin asettaneet tavoitteekseen metsäkadon pysäyttämisen tiettyyn vuoteen mennessä (Brown & Zarin, 2013). Esimerkiksi Suomi on allekirjoittanut Glasgow'n metsäjulistuksen, jonka tarkoituksena on lopettaa metsien hävittäminen vuoteen 2030 mennessä (Valtioneuvosto, 2021).

Tavoite metsäkadon pysäyttämisestä vaikuttaa yksinkertaiselta ja tarkalta, mutta todellisuudessa mittaus- ja laskentatavan mukaan tavoite muuttuu merkittävästi globaalissa mittakaavassa. Metsäkadon pysäyttämiseksi metsiä täytyy mitata, joka voidaan tehdä joko netto tai bruttona. Netto lasketaan ottaen huomioon sekä metsän hävittämisen sekä sen uudistamisen ja istuttamisen jaettuna kyseisen aikaikkunan kestolla. Bruttona metsäkatot mitataan laskemalla yhteen hävitettyjen metsien pinta-ala tiettyssä aikaikkunassa. (Brown & Zarin, 2013). Valtioiden tulisi mitata metsiään sekä hiilidioksidin varastoitumisissa niissä, jotta ne voivat saavuttaa tavoitteitaan Yhdistyneiden kansakuntien ilmastosopimuksen mukaisesti sekä mahdollisesti myös Kioton pöytäkirjan mukaisesti (Brown, 2002).

Metsien hiilinielujen mittaaminen ei ole yksikertaista, koska hiili varastoituu metsissä moniin eri muotoihin. Hiili voi olla varastoituneena maanpinnan yläpuolelle runkoon ja oksistoon, maanpinnan alapuolelle juuristoihin, kuolleisiin puihin pystyssä, maassa tai maan sisässä, maatumattomaksi lehtien ja muun puuaineksen kerrastoiksi maassa sekä muuksi maaperässä olevaksi orgaaniseksi hiileksi. (Zhang et al., 2012 s. 142) Hiilinieluja voidaan arvioida mittaamalla biomassan määrää tai hiilidioksidin virtaamista (Zhang et al., 2012, s. 142). Biomassaa mitatessa voidaan keskittyä joko maanpinnan yläpuolisen tai alapuolisen biomassan mittaamiseen (Brown, 2002). Hiilinielujen mittaamiseen on monia eri menetelmiä. Seuraavista menetelmien kategorioista kaksi ensimmäistä keskittyy biomassan mittaamiseen maanpinnan yläpuolella ja kaksi viimeistä hiilidioksidin virtaamisen mittaamiseen. Zhangin et al. (2012) mukaan hiilinielujen mittaamiseen tarkoitettuja menetelmiä voidaan jakaa kategorioihin seuraavasti:

1. Metsien inventaariot ja biomassan määrän arviointi
2. Kaukokartoitusteknologioilla biomassan ja metsän pinta-alan suhteen arviointi
3. Pyörrekovarianssimenetelmällä hiilidioksidin virtaamisen suora mittaaminen
4. Käänteismenetelmällä biomassan, hiilidioksidin paikallisen virtaamisen ja hiilidioksidin ilmakehässä liikkumisen suhteiden arviointi. (Zhang et al., 2012 s. 139)

Näillä menetelmillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Esimerkiksi mittaolosuhteet ja käytettävät resurssit vaikuttavat menetelmillä saatavaan datan laatuun (Zhang et al., 2012, s. 139).



**Kuva 1.** Metsien hiilinielujen mittausmenetelmiä.

Tässä tutkimuksessa käsitellään neljää erilaista menetelmää metsien hiilinielujen mittaamiseen. Vasemmalla vihreän laatikon sisälle on asetettu metsien inventaariot ja kaukokartoitusteknologiat, koska niiden toiminta perustuu biomassan määrän arvioimiseen. Oikealla sinisessä laatikossa ovat pyörrekovarianssi- ja käänteismenetelmä, koska ne mittaavat hiilidioksidin virtaamista ja sen avulla arvioidaan hiilinielujen kokoa. Menetelmien alle on listattuna niiden toiminnalle ominaisia piirteitä. (Kuva 1)

### 3.2 Metsien inventaariot

Maan pinnan yläpuolella olevan biomassan määrää voidaan arvioidaan inventaarioiden perusteella kahdella eri lähestymistavalla riippuen minkälaista dataa on käytettävissä (Brown, 2002; Zhang et al., 2012, s. 142). Ensimmäinen vaihtoehto on arvioida biomassaa puiden tilavuuksien avulla ja toinen vaihtoehto on arvioida biomassaa puiden runkojen halkaisijoiden avulla (Brown, 2002; Zhang et al., 2012, s. 142). Tyypillisesti tilavuuden avulla biomassan arviointi on tavallisempaa, koska se vaatii vähemmän yksityiskohtaista inventointi dataa (Zhang et al., 2012, s. 142). Halkaisijan avulla arvoidun biomassan määrä on kuitenkin yleensä tarkempi, joten sitä suositetaan, mikäli tarpeeksi tarkkaa dataa on tarjolla (Zhang et al., 2012s, s. 142).

Maanpinnan alapuolelle sitoutuneen hiilidioksidin määrää on haastavampaa arvioida kuin pinnan yläpuolelle (Brown, 2002). Harvat metsäinventaarit ottavat huomioon maanpinnan alapuolisen biomassan kuten kuolleen kasvillisuuden ja kuolleen puumassan (Zhang et al., 2012, s. 140). Maapinnan yläpuolella olevien puiden osien biomassan avulla voidaan arvioida myös maanpinnan alapuolella juurissa olevan biomassan määrää (Brown, 2002). On kuitenkin kehitetty muita tekniikoita, joilla pyritään arvioimaan maaperään sitoutuneen hiilidioksidin määrää (Stockmann et al., 2013, s. 86) mutta, nämä eivät välttämättä perustu metsien inventaarioihin.

### 3.3 Kaukokartoitusteknologiat

Kaukokartoitusteknologiat mittaavat ympäristöään eri aikajaksoilla. Näiden sensorit pystyvät kuvantamaan elektromagneettisen energian ja aineen vuorovaikutusta valituilla valon aallonpituuksilla. Näin voidaan seurata esimerkiksi metsien muutoksia. (Patenaude et al., 2005, s. 162) Kaukokartoituksessa hyödynnettäviä menetelmiä ja teknologioita on useita, mutta ne voidaan jakaa kahteen kategoriaan: passiiviset optiset sekä aktiiviset radar (radio detection and ranging) ja lidar (light detection and ranging) teknologiat. Optiset menetelmät ainoastaan havaitsevat auringonvalon heijastumista metsistä, kun taas aktiiviset radar ja lidar teknologiat lähettävät elektromagneettista säteilyä ja sitten tulkitsevat niiden heijastumia. (Zhang et al., 2012 s. 146)

Optista kaukokartoitusta suoritetaan esimerkiksi ilma- ja satelliittikuvien avulla (Zhang et al., 2012 s. 150). Optiseen kaukokartoitukseen vaikuttaa merkittävästi se, kuinka kaukana maaperästä mittaukset tehdään. Tämän mukaan eri optiset mallinnukset voidaan jakaa kolmeen kategoriaan resoluution eli kuvatarkkuuden perusteella. Hienon resoluution mittaukset suoritetaan alle kymmenen metrin päästä mitattavista kohteista. Hienon resoluution mittauksilla voidaan arvioida metsän biomassaa, puiden korkeuksia sekä lajeja. Keskikoon mittaukset tehdään 10–100 metrin korkeudella metsästä. Nämä soveltuvat hyvin alueellisiin maapinnan yläpuolella olevan metsän biomassan arviointeihin, koska menetelmä on suhteellisen halpa ja tarkkuus inventaarioihin verrattuna on riittävä. (Zhang et al., 2012 s. 147) Karkean resoluution mittaukset sopivat suuriin kansallisiin tai maanosan laajuisiin mittauksiin ja ne tapahtuvat yli 100 metrin korkeudessa. Tästä saatavan datan hyödyntäminen on kuitenkin rajallista suuren pikselikoon vuoksi (Zhang et al., 2012, s. 148).

Lidar ja radar teknologiat ovat aktiivisia kaukokartoitusmenetelmiä. Niiden toiminta ei perustu auringon valon säteilylle, vaan ne itsenäisesti tuottavat elektromagneettista säteilyä. Radar systemit lähettävät mikroaaltopulsseja kohteeseen ja sitten mittavat palautuvan säteilyn aallonpituuden sekä suunnan. Radarin aallonpituus voi tunkeutua sadeepisaroiden ja pilvien läpi eikä siihen vaikuta auringonvalon aiheuttamat varjot. Optiset menetelmät mittaavat eroja heijastuksissa erilaisista kasvillisuuksista ja mineraaleista. Radar sen sijaan mittaa kohteen pinnan karheutta, geometriaa ja vesipitoisuutta. (Zhang et al., 2012, s. 150)

Radarin mikroaaltojen sijaan lidar hyödyntää laservaloa. Lidar mittaukset suoritetaan yleensä ilmasta käsin lentokoneista tai helikoptereista. Lidarin tuottamat laservalopulssit heijastuvat maanpinnalla olevista kohteista ja sensorit havaitsevat niiden heijastukset. Laitteet mittavat kuinka

kauan valopulsseilta kestää siirtyä kohteeseen ja heijastua takaisin. Radar ja optisista mittauksista eroten lidar ei tuota mittaustuloksia kuvamuotoisina. (Zhang et al., 2012 s. 152) Sen sijaan lidar taas pystyy mallintamaan yksityiskohtaisesti metsän rakennetta, puiden korkeuksia sekä lajeja (Zhang et al., 2012 s. 150).

### 3.4 Pyörrekovarianssimenetelmä

Pyörrekovarianssimenetelmä perustuu hiilidioksidin sitoutumisen ja vapautumisen mittaamiseen ekosysteemin ja ilmakehän välillä. Menetelmässä mitataan ilmasta tuulen nopeutta kolmiulotteisesti ja hiilidioksidin konsentraatiota. Hiilidioksidin virtaaminen määritellään pystysuuntaisen tuulen nopeuden ja hiilidioksidin konsentraation kovarianssin perusteella. Mittaukset suoritetaan metsän latvakerroksen yläpuolella. Pyörrekovarianssimittauksille ominaista on mittausten suuri taajuus eli laitteistot suorittavat mittauksia jopa 10–20 kertaa sekunnissa. (Zhang et al., 2012, s. 153)

Pyörrekovarianssimenetelmä on suosittu tarkkuutensa ansiosta. Päiväsaikaan mitattu hiilidioksidin virtaus arvioidaan yleensä alle 5 % liian pieneksi ja yöaikaan alle 12 %. Pyörrekovarianssimenetelmä kärsii kuitenkin useista systemaattisista virheistä, jotka huonontavat mittausten laatua. Menetelmä olettaa metsän latvuston olevan homogeeninen eli tasainen, sääolosuhteiden vakaita ja ilmanvirtauksen muuttumaton. Sään, laitevikojen tai muusta syystä syntyvät aukot datassa pyritään täydentämään arvioilla. Nämä perustuvat kansainvälisesti muista mittareista kerättyyn dataan. Tietyt metsätyypit ovat kuitenkin mittaustaikojen joukossa aliedustettuina, jolloin datassa olevien aukkojen täyttäminen kärsii. (Zhang et al., 2012, s. 154)

### 3.5 Käänteismenetelmä

Käänteismenetelmän käyttäminen hiilinielujen arvioimiseen perustuu epäsuorasti hiilidioksidin nielujen ja lähteiden hiilidioksidikonsentraatioihin. Apuna käytetään bayesilaista käänteislaskentatekniikkaa, joka laskee hivenkaasujen kuten hiilidioksidin nieluja ja lähteitä hyödyntäen kolmiulotteisia kuljetusmalleja. Kuljetusmallien tarkkuus ja ilmakehän hiilidioksidipitoisuuden datan laatu määräävät käänteismenetelmän tarkkuuden. Hiilidioksidivirtojen arvioimisen parantamiseksi menetelmää on testattu, kalibroitu ja arvioitu alueellisilla ja maanosien laajuuksilla. Lisäksi käänteismenetelmän parantamisessa on hyödynnetty kuuttatoista erilaista kuljetusmallia sekä useita ilmakehän hiilidioksidipitoisuuksia käsitteleviä aineistoja. (Zhang et al., 2012, s. 156)

## 4. DATAN LAATU

Tässä luvussa määritellään, mitä datan laadulla tarkoitetaan. Tämän jälkeen datan laatua tarkastellaan eri dimensioissa Cain ja Zhun teoreettisen mallin avulla. Lopuksi pohditaan datan laadun merkitystä päätöksenteolle.

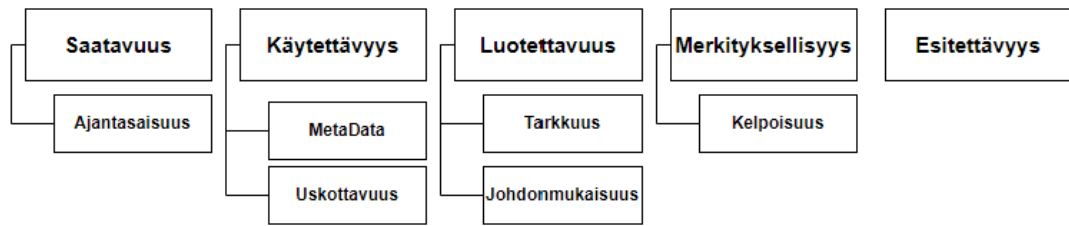
### 4.1 Datan laadun määrittäminen

Datan laadun määrittämistä varten tutkitaan ensiksi, mitä laadulla tarkoitetaan. Cain ja Zhun (2015) mukaan laadun määritelmiä on esitetty 1950-luvulta lähtien, kun tuotteiden laatua haluttiin ymmärtää paremmin. Termillä laatu voidaan viitata siihen, kuinka hyvin asian ominaisuudet täyttävät tälle asialle asetetut vaatimukset, sopivuutena käyttöön ja vaatimustenmukaisuutena. (Cai & Zhu, 2015 s. 2) Näitä määritelmiä yhdistää niiden subjektiivisuus. Jokainen näistä määritelmistä suhteuttaa laadun siihen, mitä tuotteelta tai asialta vaaditaan käytössä tilanne kohtaisesti. Voitaaneen siis todeta, että ei välttämättä ole olemassa tarkkaa ja yksityiskohtaista määritelmää laadulle, joka pitäisi paikkansa kaikissa tilanteissa.

Datan laatua on alettu tutkimaan 1990-luvulla ja sillekin on esitetty useita määritelmiä riippuen valituista näkökulmista. Näistä esimerkkejä ovat datan laadun määrittäminen käyttäjäkokemusten avulla, erilaisten laatuominaisuuksien arvioimista internetistä saatavasta datasta, yksittäisten internetsivujen tiedon laadun arvioimista kyselylomakkeilla käyttäjiltä sekä yhteiskunnan ja kulttuurin näkökulmasta. Eri tutkijat ovat näkökulmiensa mukaan esittäneet datan laadulle erilaisia dimensioita, kriteereitä ja tasoja. Esimerkkejä näistä ovat Alexanderin ja Taten kuusi kriteeriä: auktoriteetti, tarkkuus, objektiivisuus, käypäisyys, kattavuus ja vuorovaikutus. Gauch puolestaan on ehdottanut kuutta laatumittaria, jotka ovat käypäisyys, saatavuus, käytettävän tiedon suhde käyttökelvottomaan, auktoriteetti, suosio ja yhteenkuuluvuus. (Cai & Zhu, 2015 s. 2)

### 4.2 Datan laadun dimensiot

Cain ja Zhun (2015) mukaan datan laatua voidaan tarkastella viidestä eri dimensiosta: saatavuus, käytettävyys, luotettavuus, merkityksellisyys ja esitettävyys. Nämä voidaan edelleen jakaa yhdestä viiteen alakohtaan, joilla kyseistä dimensiota tarkennetaan. Alla olevassa kuvassa ovat ylärivillä esiteltynä viisi dimensiota. Näiden alakohdista kuvassa ovat esitettynä kuitenkin vain ne, jotka ovat tälle tutkimukselle olennaisia myöhemmin. (Kuva 2)



Kuva 2. Datan laadun dimensiot mukailten (Cai & Zhu, 2015 s. 4).

### 4.2.1 Saatavuus

Ensimmäisellä dimensiolla saatavuus ja sen alakohdilla pyritään arvioimaan, kuinka helposti datan käyttäjät voivat saavuttaa tarvitsemansa datan ja siihen liittyvät muut tiedot (Cai & Zhu, 2015 s. 4). Alakohdista ajantasaisuudella tarkoitetaan sitä, kuinka kauan datan tuottamisesta ja hankinnasta kuluu datan hyödyntämiseen (Cai & Zhu, 2015, s. 5).

### 4.2.2 Käytettävyys

Käytettävyys kuvaa, että onko data sellaista, että se täyttää käyttäjän tarpeet (Cai & Zhu, 2015 s. 4). Tähän liittyvällä alakohdalla metadata kuvaillaan dataa itseään. Metadatan tehtävä on kuvailla, määritellä ja mahdollisesti kommentoida varsinaista dataa (Nadkarni, 2011). Alakohdista uskottavuuteen liittyy esimerkiksi se, kuinka usein ammattilaiset tarkistavat datan oikeellisuuden (Cai & Zhu, 2015 s. 5).

### 4.2.3 Luotettavuus

Luotettavuus nimensä mukaan viittaa siihen, kuinka luotettavana käytettävää dataa voidaan pitää (Cai & Zhu, 2015 s. 4). Datan luotettavuutta voidaan kuvailla datan tarkkuuden, johdonmukaisuuden, aukottomuuden, eheyden ja tarkastettavuuden avulla (Cai & Zhu, 2015 s. 4). Cain ja Zhun (2015) mukaan tarkkuudella viitataan esimerkiksi siihen, kuinka tarkkaan jostain mittauksesta saatavat tulokset vastaavat todellisuutta. Johdonmukaisuudella tarkoitetaan sitä, että tietyllä aikavälillä data säilyy johdonmukaisena ja todenmukaisena. Johdonmukaisuutta ja vahvistettavuutta vaaditaan myös eri data lähteiden välisiä tietoja vertaillaessa (Cai & Zhu, 2015, s. 5).

### 4.2.4 Merkityksellisyys

Merkityksellisyys kuvaa datan sisällön suhdetta siihen, mitä ovat datan käyttäjän vaatimukset ja oletukset datalle (Cai & Zhu, 2015). Merkityksellisyyttä voidaan kuvailla datan kelpoisuuden avulla. Datan kelpoisuuden mittareita ovat esimerkiksi se, kuinka hyvin käytettävä data sopii käyttäjän toivoman teeman alle (Cai & Zhu, 2015 s. 5).

### 4.2.5 Esitettävyys

Datan ei voida katsoa olevan laadultaan hyvää, mikäli sitä ei voida esittää ja ymmärtää. Datan ymmärtämiseksi sen sisällön tulisi olla selkeää ja siitä tulisi voida helposti arvioida, kuinka hyvin

se täyttää sille asetetut vaatimukset. Datan kuvauksia ja luokitteluja tulisi voida ymmärtää helposti. (Cai & Zhu, 2015 s. 5)

### 4.3 Datan laadun merkitys päätöksenteolle

Huono laatuinen data voi johtaa huonoihin lopputuloksiin päätöksentekotilanteissa (Moges et al., 2016, s. 32). Huonolla datan laadulla voi olla huomattavia vaikutuksia niin sosiaalisesti kuin taloudellisesti yrityksille (Wang & Strong, 1996). Erityisesti ympäristöön liittyvissä taloudellisissa päätöksissä datan laadun arvioiminen tarkkuuden näkökulmasta on tärkeää, mutta myös muut datan laadun dimensiot tulisi ottaa huomioon (Vardon et al., 2018,). Syitä datan laadun heikkoudelle voivat olla esimerkiksi datan suuri määrä ja datan yhdisteleminen eri lähteistä (Moges et al., 2016, s. 32). Päätöksentekijöiden kouluttaminen datan laadun merkityksestä voi vaikuttaa positiivisesti päätöksentekoprosessin tuloksiin. Päätöksentekijöiden tulisi pystyä muokkaamaan omaa päätöksentekoprosessiaan sen mukaan, kuinka laadukasta dataa aiheesta on tarjolla (Moges et al., 2016, s. 32). Tämän lisäksi heidän tulisi ymmärtää, että datan laatu on sidottu kontekstiin ja sama data voi olla eri tilanteissa laadultaan erilaista (Moges et al., 2016, s. 33). Esimerkiksi datan kelpoisuutta arvioidaan usein kvalitatiivisesti eikä sitä voida välttämättä arvioida objektiivisesti (Vardon et al., 2018, s. 84).

Päätöksentekoa voidaan tukea tiedon avulla. On kuitenkin mahdollista, että jää päätöksentekijöiden vastuulle arvioida kuinka luotettavaa saatavilla oleva data on. Eri lähteistä voidaan kerätä ja yhdistellä tietoa, mutta datan laatuun liittyvät ongelmat voivat pahentua tällaisissa tilanteissa (Moges et al., 2016, s. 32). Liiketoimintaan liittyvissä päätöksissä voidaan yrittää ennustaa tulevaa, jolloin päätöksentekijöiden olisi erityisen tärkeää ymmärtää datan laatua, johon he päätöksiään tukevat (Moges et al., 2016, s. 32). Datan laatu on lisäksi kontekstiin sidottua, joten esimerkiksi yrityksen kirjanpitoa varten tuotettu hyvä laatuinen data ei välttämättä ole enää hyvä laatuista, jos sillä tuotetaan ennusteita myyntiä varten (Moges et al., 2016, s. 33).

Datan laadussa olevat ongelmat korostuvat erityisesti tilanteissa, joissa datan määrät ovat suuria (Moges et al., 2016, s. 32). Kun datan määrät ovat suuria, voidaan käyttää aiheesta termiä *big data*. Big datalle ominaista on esimerkiksi se, että datan määrä kasvaa hyvin nopeasti suhteessa resursseihin, joilla dataa voidaan käsitellä (Katal et al., 2013, s. 404). Big data voi sisältää paljon erilaisia tietotyyppisiä, mistä johtuen osa datasta on jäsenneiltyä ja osa ei (Cai & Zhu, 2015, s. 2). Data voi myös olla jäsentelyn tasoltaan jotain näiden kahden väliltä. Tietotyypeiltään eroavan datan käsittely vaatii tehokkaampia järjestelmiä (Cai & Zhu, 2015, s. 2). Näiden lisäksi big datan arvoa voidaan mitata sen suhteessa, kuinka paljon liiketoiminnan kannalta merkityksellistä dataa on kaiken muun datan joukossa (Katal et al., 2013, s. 405).



## 5. DATAN LAADUN PARANTAMINEN HIILINIELUMITTAUKSISSA

Tässä luvussa aluksi tutkitaan, miten datan laadun eri dimensiot toteutuvat erilaisissa hiilinielumittauksissa. Sitten pohditaan, mitä asioita tulisi kehittää, jotta hiilinieluista mitattavan datan laatua voitaisiin parantaa. Lopuksi tutkitaan, miten datan laatu vaikuttaa tässä tapauksessa päätöksentekoprosessiin.

### 5.1 Datan laatu erilaisissa hiilinielumittauksissa

Luvussa kolme on esitelty erilaisia menetelmiä, joilla metsien hiilinieluja voidaan mitata. Luvussa neljä vuorostaan esiteltiin datan laadun dimensioita, joiden avulla datan laatua voidaan tarkastella. Alla olevassa taulukossa on esitelty eri hiilinielujen mittaustavat sekä luvun neljä mukaiset datan laadun dimensiot. Kun tietyssä mittaustavassa aiheutuu datan laadulle jotain ongelmia, on kyseisen ongelman mukaisen dimension kohdalle merkattu rasti. Esimerkiksi metsien inventaarioista saatava data ei välttämättä ole täysin ajankohtaista. Ajankohtaisuus on osa saatavuuden dimensiota, joten sen kohdalla on rasti.

**Taulukko 1.** Hiilinielujen mittaustapojen datan vertailua datan laadun dimensioissa.

Mittaustapa/ datan dimensio	Metsien inventaariot	Kaukokartoitus- teknologiat	Pyörrekovarianssimenetelmä	Käänteismenetelmä
Saatavuus	X			
Käytettävyys				
Luotettavuus	X	X	X	X
Merkityksellisyys			X	
Esitettävyys				

#### 5.1.1 Metsien inventaarioiden datan laatu

Useimmat kehittyneet maat tekevät säännöllisesti metsien inventaarioita (Brown, 2002). Suomessa Luonnonvarakeskus Luke toteuttaa säännöllisesti Valtakunnan metsien inventoinnin (VMI) (Valtakunnan metsien inventointi (VMI)-kuvaus). VMI-kuvaus perustuu tilastolliseen otantaan eli eri puolella Suomea sijaitsevista koealoista mitataan jopa yli sata erilaista tunnusta, joiden pohjalta tuotetaan metsävaratietoja (Valtakunnan metsien inventointi (VMI)-kuvaus). VMI-kuvaus toteutetaan Suomessa 5 vuoden välein mutta dataa metsävaroista julkaistaan vuosittain (Metsäva-

rat). Metsien inventaarioista saatavan datan luotettavuuden vaikuttaa yksilöiden kyvykkyys suorittaa kyseisiä mittauksia (Zhang et al., 2012 s. 146). Cai ja Zhu (2015) esittävät luotettavuuden yhdeksi dimensioksi, josta datan laatua voidaan tarkastella. Vaikuttaakin siltä, että metsien inventaarioiden tapauksessa tässä dimensiossa voidaan nähdä olevan puutteita.

Luotettavuuden dimension lisäksi metsien inventaarioissa voi olla ongelmia saatavuuden dimensiossa. Ajankohtaisuus on yksi saatavuuden dimension alakohta ja sitä indikoi aika, joka kestää datan tuottamisesta sen julkaisemiseen käyttöön (Cai & Zhu, 2015, s. 5). Metsien inventaarioiden tapauksessa ajankohtaisuutta heikentää se, että julkaistavat tiedot voivat perustua useampia vuosia sitten mitattuihin aineistoihin. Esimerkiksi Suomessa Luken toimesta 15.11.2023 julkaistut tiedot metsävaroista maakunnittain perustuvat vuosina 2018–2022 mitattuun VMI-aineistoon (Metsävarat maakunnittain).

### **5.1.2 Kaukokartoitusteknologioiden datan laatu**

Kaukokartoitusteknologioita käyttäessä tuloksien laatu on tarkinta, kun mittaukset suoritetaan metsissä, joissa puiden kasvutiheys on harvaa tai keskivertoa (Zhang et al., 2012 s. 151). Kaukokartoitusteknologioita hyödyntäessä datan laatu kärsii myös tilanteissa, joissa mittauksia suoritetaan esimerkiksi vuorilla ja rinteillä (Zhang et al., 2012, s. 153). Mittauspaikalla voi olla vaikutusta datan laadun dimensioista luotettavuuteen. Yksi luotettavuuden alakohdista on tarkkuus (Cai & Zhu, 2015, s. 6). Tarkkuutta indikoi esimerkiksi se, kuinka hyvin datan arvot kuvastavat tilanteen todellista tilaa (Cai & Zhu, 2015, s. 5).

Kaukokartoitusteknologioilla biomassan määrää voidaan arvioida ja vertailla hyödyntäen erilaisia kaukokartoitusteknologioita ja tietoaaineistoja. Tässä on kuitenkin syytä olla varovainen, koska tulokset voivat vaihdella eri mittausten välillä eri teknologioiden ja aineistojen vuoksi. (Zhang et al., 2012, s. 152) Koska eri kaukokartoitusmenetelmillä mitattu data ei ole aina vertailu kelpoista, luotettavuuden dimensiossa myös johdonmukaisuus voi olla heikkoa. Alakohdalla johdonmukaisuus tarkoitetaan sitä, että korreloivien datojen välisen suhteen tulisi olla yhdenmukainen (Cai & Zhu, 2015, s. 6). Johdonmukaisuutta indikoi esimerkiksi se, että eri lähteiden väliset datat vastaavat toisiaan ja ne voidaan vahvistaa tosiksi (Cai & Zhu, 2015, s. 5).

### **5.1.3 Pyörrekovarianssimenetelmän datan laatu**

Pyörrekovarianssimenetelmä perustuu erilaisille oletuksille tasaisuudelle sääolosuhteiden, metsän rakenteen ja ilmanvirtauksien suhteen (Zhang et al., 2012, s. 154). Tämän vuoksi mittauksissa syntyy systemaattisia virheitä, jotka täytyy huomioida hyvän datan laadun saavuttamiseksi (Zhang et al., 2012, s. 154). Systemaattiset virheitä syntyy esimerkiksi öisin, koska tällöin tuulen nopeus laskee, lämpötila laskee sekä ilmaan syntyy ajoittaista turbulenssia (Zhang et al., 2012, s. 155). Lisäksi kaltevassa maastossa systemaattiset virheet lisääntyvät, koska ilmanvirtaukset käyttäytyvät eritavalla kuin tasaisessa maastossa (Zhang et al., 2012, s.155). Menetelmässä olevien systemaattisten virheiden voidaan katsoa heikentävät hiilinieluista saatavan datan laatua. Cain ja Zhun (2015) mukaan, jos data ei kuvaa todellisuutta hyvin, se ei ole tarkkaa. Tarkkuus

kuuluu datan laadun dimensioista luotettavuuteen, joten systemaattisia virheitä sisältävää dataa ei voi pitää erityisen luotettavana (Cai & Zhu, 2015, s. 5).

Systemaattisten virheiden lisäksi pyörrekovarianssi datassa on usein aukkoja, koska mittaukset voivat keskeytyä esimerkiksi huonon sään vuoksi. Aukkoja ja systemaattisia virheitä datassa pyritään korjaamaan eri mallien avulla, jotka pohjautuvat dataan, jota on kerätty ympäri maapalloa eri mittauspisteillä. (Zhang et al., 2012, s. 155) Maapallon pohjoisimmissa osissa tehtyjen pyörrekovarianssimittausten aukkojen täydentäminen yleisellä marginaalijakaumaotantaan (MDS) perustuvalla systeemillä aiheuttaa systemaattisia virheitä (Vekuri et al., 2023, s. 1). MDS-menetelmä ei ota huomioon riittävällä tavalla pohjoisimpien leveyspiirien ilmaston ominaispiirteitä, jotka liittyvät esimerkiksi valon määrän epätasaiseen jakautumiseen eri vuoden aikoina (Vekuri et al., 2023, s. 2).

Cain ja Zhun (2015) mukaan, jos kerätty data ei vastaa käyttäjän tarpeita, on datan laadussa ongelmia kelpoisuudessa. Kelpoisuus on osa merkityksellisyyden dimensiota (Cai & Zhu, 2015, s. 4). Voitaneen todeta, että pohjoisten leveysasteiden osalta pyörrekovarianssimenetelmällä mitattavassa datassa on heikkouksia kelpoisuuden ja täten myös merkityksellisyyden osalta.

#### **5.1.4 Käänteismenetelmän datan laatu**

Käänteismenetelmällä on heikkouksia kuten muillakin hiilinielujen arviointiin käytetyillä menetelmillä. Käänteismenetelmien kaikki mallit toimivat paremmin valtamerillä mitatessa kuin mantereilla. (Zhang et al., 2012, s. 157) Datan laadun osalta mittauspaikka näyttää vaikuttavan negatiivisesti erityisesti luotettavuuteen. Koska tulokset eivät ole mantereella yhtä hyviä kuin valtamerillä mitattuna, datan laadussa voi olla ongelmia tarkkuudessa. Cai ja Zhu (2015) mukaan datan tarkkuutta voidaan kuvata siten, että tuotetun datan tulisi olla täsmällistä ja siten kuvastaa todellisuutta tarkasti. Käänteismenetelmällä mitatun datan tarkkuuteen voidaan nähdä vaikuttavan negatiivisesti myös esimerkiksi tulivuorenpurkaukset tai Etelä-Amerikan El Nino -ilmiö. Tällaiset suuret ilmastoon vaikuttavat ilmiöt aiheuttavat käänteismenetelmällä mitattavaan dataan vinoumia. (Zhang et al., 2012, s. 158)

Käänteismenetelmää hyödyntäessä erot käytetyissä aineistoissa voivat johtaa suuriin eroihin arvioinneissa (Zhang et al., 2012, s. 157). Tämänkin voidaan nähdä vaikuttavan datan laadun luotettavuuteen ja sen alla johdonmukaisuuteen. Datan ollessa johdonmukaista se tuottaa samantaisia tuloksia kuin, mitä vastaavista lähteistä saatavalla datalla saadaan (Cai & Zhu, 2015 s. 5).

## **5.2 Mittausten datan laadun parantaminen**

Metsien inventaarioita suorittaessa mittauksia tekevien yksilöiden ammattitaidolla on merkitystä sille, kuinka hyvää inventaarioista saatava data on (Zhang et al., 2012, s. 146). Jos inventaarioita suorittaville henkilöille asetetaan jotain vaatimuksia pätevydestä, voi olla mahdollista, että inventaarioista saatavan datan laatu paranee. Kaukokartoitusteknologiat eivät onnistu tuottamaan kovin luotettavaa dataa, kun mittauksia suoritetaan esimerkiksi tiheiköissä tai rinteillä. Zhangin et al.

(2012) mukaan mittausmenetelmien yhdisteleminen erityisesti kaukokartoitusmenetelmien ja inventaarioiden tapauksessa on suositeltavaa laadukkaamman datan saavuttamiseksi.

Molemmat sekä pyörrekovarianssi- että käänteismenetelmä voisivat mahdollisesti tuottaa parempaa dataa hiilidioksidin virtauksista, mikäli mittauspisteitä olisi enemmän sekä laajasti erilaisissa ympäristöissä. Zhang et al. (2012) mukaan eräs edistyneimmistä ja laajinten nykyään käytetyistä käänteismenetelmään perustuvista malleista on CarbonTracker. Tämän mallin tarkkuus perustuu kuitenkin siihen, kuinka monesta erillisestä mittauspisteestä ja kuinka laadukasta lähtödataa on tarjolla. Menetelmällä tehtävien arvioiden tarkkuus paranisi, mikäli mittauspisteiden verkosto kasvaisi. (Zhang et al., 2012, s. 158) Pyörrekovarianssimenetelmän tapauksessa puutteet mittausverkoston laajuudessa käyvät ilmi ainakin pohjoistenleveyspiirien osalta. Pyörrekovarianssimenetelmään liittyviä mittauksia suoritetaan FLUXNET verkostossa yli 900 mittauspisteellä (Vekuri et al., 2023, s. 1). Kuitenkaan näillä mittauspisteillä pohjoisimmat leveys asteet eivät ole riittävän edustettuina, jotta niistä saatava datalla voitaisiin MDS-menetelmällä täyttää pyörrekovarianssimenetelmälle ominaisia aukkoja hyvin (Vekuri et al., 2023, s. 2).

### 5.3 Päätöksenteon tukeminen

Luvussa 4.3 käsiteltiin datan laadun merkitystä päätöksenteolle ja mainittiin, että päättäjien tietoisuus datan laadusta voi parantaa tehtävien päätösten laatua. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että päättäjille tulisi tarjota metadataa varsinaisesta datasta (Moges et al., 2016). Pyörrekovarianssimenetelmän tapauksessa tämä voisi tarkoittaa esimerkiksi sitä, että Vekuri et al. (2023) mukaan pohjoisten leveysasteiden metsien hiilinielujen kokoa arvioidaan systemaattisesti liian pieniksi. Mikäli päätökset metsien käytöstä perustuvat osittain pyörrekovarianssimenetelmästä saatavalle datalle, päättäjien Suomessa voisi olla hyvä tietää menetelmän heikkouksista pohjoisilla leveyspiireillä. Kuitenkin metadatan ymmärtäminen niin, että siitä on hyötyä päätöksentekijöille voi vaatia heiltä kognitiivisia kykyjä, joita heillä ei välttämättä ole (Moges et al., 2016). Lisäksi metadatan tuottaminen, ylläpitäminen ja käsitteleminen varsinaisesta datasta voi olla kallista (Moges et al., 2016). Vaikuttaa kuitenkin siltä, että päätöksentekijöiden kouluttaminen datan laadusta parantaa heidän kykyjään tehdä hyviä päätöksiä (Moges et al., 2016).

Metadatan tarjoamisen lisäksi päätöksentekijöitä voidaan tukea esimerkiksi ympäristötaloudellisella kirjanpitojärjestelmällä. Ympäristö-taloudellinen kirjanpitojärjestelmä eli System of Environmental-Economic Accounting (SEEA) on jaettu Eurooppalainen ympäristötietojärjestelmä, joka pyrkii parantamaan tietojärjestelmiä ja tiedon laatua päätöksenteko tilanteissa (Vardon et al., 2018, s. 1). SEEA:n toiminta perustuu eri tietolähteistä saatavan tiedon yhdistelyyn, jotta uutta tietoa saadaan säännöllisesti. Tietojen yhdisteleminen eri lähteistä voi kuitenkin aiheuttaa ongelmia (Moges et al., 2016, s. 32).

SEEA-kirjanpitojärjestelmä arvioi dataa merkityksellisyyden, tarkkuuden, ajankohtaisuuden, saatavuuden, tulkittavuuden ja yhtenäisyyden avulla (Vardon et al., 2018, s. 84). Dimensiot ovat osittain samoja, joita on hyödynnetty tässä tutkimuksessa Cain ja Zhun (2015) teoreettisen mallin mukaisesti arvioidessa eri hiilinielumittausmenetelmien datan laatua. Dataa tarkastellaan näistä

kuudesta dimensiosta SEEA:ssa, koska taustalla on ajatus datan eheydestä eli datan laatua ohjataan eettisillä ja läpinäkyvillä standardeilla (Vardon et al., 2018, s. 84). Kun standardit ovat selkeitä, dataa tuottavien tahojen on helpompi tarkastella omaa toimintaansa ja suoriutumistaan sekä ulkoisesti että sisäisesti (Vardon et al., 2018, s. 85). SEEA ottaa huomioon, että hallitukset ja yritykset joutuvat tekemään päätöksiä niillä tiedoilla, jotka ovat saatavilla ja osa datan laadun dimensioista voivat tällöin kärsiä (Vardon et al., 2018, s. 84).

## 6. PÄÄTELMÄT

Tässä kirjallisuuskatsauksessa tutkittiin datan laatua erilaisten hiilinielujen mittausten menetelmien kautta. Seuraavaksi esitellään ja arvioidaan tutkimuksen tuloksia. Myös tutkimuksen toteutumisen onnistumista arvioidaan. Lopuksi esitellään muutamia ajatuksia, joiden mukaisesti jatkotutkimuksia on mahdollista lähteä suorittamaan.

### 6.1 Tutkimuksen tulokset

Tutkimuksen ensimmäinen alatutkimuskysymys oli: "Miten metsien hiilinieluja mitataan?" Tähän kysymykseen on vastattu pääasiassa luvussa kolme. Tutkimuksessa löydettiin neljä erilaista tapaa mitata hiilinieluja: metsien inventaariot, kaukokartoitusteknologiat, pyörrekovarianssimenetelmä sekä käänteismenetelmä. Näistä kahdessa ensimmäisessä menetelmässä tutkitaan ensin metsissä olevan biomassan määrää, josta voidaan sitten arvioida, kuinka paljon hiilidioksidia on biomassaan sitoutunut. Pyörrekovarianssi- ja käänteismenetelmä taas perustuvat hiilidioksidin konsentraatioiden muutoksen mittaamiseen suoraan ilmasta. Näin arvioidaan, kuinka paljon metsä sitoo ja vapauttaa hiilidioksidia.

Toisella alatutkimuskysymyksellä tutkittiin: "Mitä ongelmia hiilinielumittauksissa saatavassa dataassa on laadun kannalta?" Kysymykseen vastataan pääasiassa luvuissa neljä ja viisi. Ensin luvussa neljä määriteltiin, millaista hyvä ja laadukas data on. Tässä teoreettisena pohjana käytettiin Cai ja Zhun (2015) mallia, jossa datan laatu jaetaan useisiin eri dimensioihin, joita voidaan tarkastella yksitellen dimensioiden alakohtien avulla. Tämän jälkeen luvussa viisi pohdittiin, miten datan laadun dimensiot näkyvät hiilinielumittausten tapauksessa. Kaikissa neljässä eri mittaustavassa ongelmia löydettiin datan luotettavuuden dimensiosta. Metsien inventaarioissa myös saatavuudessa oli ongelmia. Pyörrekovarianssimenetelmän tapauksessa ongelmia todettiin olevan merkityksellisyyden dimensiossa.

Tutkimuksen päätutkimuskysymys oli: "Kuinka hiilinieluista mitatun datan laatua voidaan parantaa?" Kysymykseen vastataan pääasiassa luvussa viisi. Metsien inventaarioiden tapauksessa datan laatu on vahvasti sidottuna yksilöihin ja taitoihin suorittaa inventaario hyvin. Tämän vuoksi datan laadun parantamisessa voisi mahdollisesti auttaa mittaajien kouluttaminen ja valvonta. Lisäksi inventaarioiden tapauksessa data ei ole kovin ajantasaista, koska esimerkiksi Suomen tapauksessa mittauksien ja niiden julkistamisen välillä voi olla jopa viisi vuotta. Kaukokartoitusteknologioilla mitatut tulokset eivät ole kaikissa ympäristöissä yhtä tarkkoja. Riippuen metsän ja maaston ominaisuuksista niillä saatavat tulokset voivat vaihdella. Kaukokartoitusteknologioilla mitattava datan laatua voitaisiin parantaa hyödyntämällä niitä tiiviisti yhdessä metsien inventaarioista saatavan datan kanssa. Pyörrekovarianssi- ja kaukokartoitusmenetelmistä saatavan datan laatua voitaisiin parantaa laajentamalla sekä monipuolistamalla ympäristöjä, joissa mittauksia

tehdään. Tällä hetkellä kummankaan menetelmän mittausverkotot eivät ole riittävän laajoja, jotta kaikenlaisista metsäympäristöistä mitattavan datan laatu olisi hyvää ja tasalaatuista.

## 6.2 Tuloksien arviointi

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten metsien hiilinieluja mitataan, kuinka laadukasta dataa näistä mittauksista saadaan ja miten datan laatua voitaisiin parantaa. Lisäksi tutkimuksessa pohdittiin datan laadun merkitystä päätöksenteolle. Tutkimuksessa onnistuttiin selvittämään, mitä erilaisia menetelmiä on, joilla metsien hiilinieluja voidaan mitata. Tutkimus ei kuitenkaan kata kaikkia erilaisia menetelmiä, joilla metsien hiilinieluja voidaan mitata. Neljän eri mittausmenetelmän keskeisimmät toimintaperiaatteet esiteltiin ja niitä onnistuttiin myös visualisoimaan kuvan avulla.

Datan laadun arviointia varten löydettiin teoreettinen malli, johon mittausmenetelmistä saatavaa dataa verrattiin. Tutkimuksen tuloksia onnistuttiin visualisoimaan ja tiivistämään hyvin taulukon avulla. Taulukossa esitellään tiiviisti, missä datan dimensioissa tietyllä mittausmenetelmällä voi olla ongelmia datan laadussa. Tutkimuksessa ei kuitenkaan välttämättä löydetty kaikkia mahdollisia puutteita datan laadussa käsitellyissä menetelmissä. Lisäksi tutkimuksessa hyödynnettiin vain yhtä mallia data laadun arvioimiseen. On mahdollista, että jokin toinen malli olisi ollut sopivampi juuri hiilinieluista mitattavan datan laadun arvioinnissa. Datan laadun merkityksestä päätöksenteolle löydettiin tietoa niin yleisellä tasolla kuin ympäristötaloudellisessa toimintaympäristössä. Datan laadussa olevien ongelmien määrittämisen avulla onnistuttiin myös löytämään muutamia ehdotuksia, joiden avulla datan laatua voitaisiin tulevaisuudessa parantaa.

Alan kirjallisuudesta löytyy tietoa eri mittausmenetelmien tarkkuudesta. Kuitenkaan sellaista tutkimusta ei onnistuttu löytämään, jossa näiden neljän eri mittausmenetelmän tuottaman datan laatua tarkasteltaisiin laajasti eri dimensioista. Näin ollen voidaan nähdä, että tutkimuksella onnistuttiin tuottamaan jotain uutuusarvoa.

Tutkimus suoritettiin kirjallisuuskatsauksena ja se eteni Finkin (2019) seitsemän vaiheen mallia mukailleen. Tutkimus aloitettiin tutkimuskysymysten rajaamisella, mistä siirryttiin rajaamaan tietokantoja ja hakusanoja, joilla tietoa sitten hankittiin. Tietoa hankittiin pääasiassa alan lehdistä, tutkimuksista sekä muista tieteellisistä julkaisuista. Tutkimusaineiston luotettavuutta parannettiin suosimalla vertaisarvioituja lähteitä sekä keskittymällä mahdollisimman uuteen kirjallisuuteen. Tieteellisten lähteiden lisäksi tietoa hankittiin myös esimerkiksi Luonnonvarakeskuksen sekä Maa- ja metsätalousministeriön internetsivuilta, koska nämä julkaisevat Suomen metsien hiilinielujen mittaamiseen liittyvää tietoa.

## 6.3 Jatkotutkimusehdotukset

Tässä tutkimuksessa hiilinielumittausten arvioimista ei ulotettu koskemaan tiettyä metsätyyppiä. Kuitenkin eri menetelmien ja teknologioiden kyky mitata hiilidioksidinieluja vaihtelee metsätyyppin ja ympäristön mukaan. Tulevaisuudessa voisi olla mielenkiintoista tutkia, että kuinka esimerkiksi

nimenomaan Suomen alueella kasvavissa metsissä nämä eri menetelmät suoriutuvat, kun käsitellään datan laatua laajasti.

Tässä tutkimuksessa metsien hiilinielujen mittausten menetelmiin tutustuttiin melko pintapuolisesti. Voi olla, että jos menetelmiin tutustuttaisiin syvemmin, voitaisiin löytää lisää erilaisia puutteita datan laadussa Cain ja Zhun esittämien dimensioiden alle. Lisäksi eri mittausten menetelmien tuottaman datan laatua arvioitaessa menetelmiä käsiteltiin melko isoina kokonaisuuksina. Kuten luvussa kolme todettiin, esimerkiksi kaukokartoitusteknologiat voidaan jakaa passiivisiin optisiin sekä aktiivisiin radar ja lidar mittauksiin. Jos mittausten menetelmiä käsiteltäisiin pienempinä kokonaisuuksina, kuin tässä tutkimuksessa käsiteltiin, voisi olla mahdollista saada tarkempia arvioita datan laadun heikkouksissa ja sitä kautta myös datan laadun parantamisessa.

Kolmas mahdollinen suunta jatkotutkimukselle olisi keskittyä enemmän päätöksenteon tukemiseen. Tätä voisi lähestyä määrittelemällä tarkemmin vielä kirjallisuuden avulla, kuinka datan laatu vaikuttaa päätöksentekoon tässä kontekstissa. Tämän jälkeen voisi tutkia lisää, millaisia järjestelmiä on kehitetty ja on kehitteillä päätöksenteon tukemiseen ympäristöön liittyvissä kysymyksissä. Tähän voisi liittää myös näkökulman siitä, kuinka yleisimmät kansainväliset sopimukset ohjailevat esimerkiksi metsiin liittyvää päätöksentekoa Suomessa tai muualla maailmassa.



## LÄHTEET

Brown, S. (2002). Measuring carbon in forests: current status and future challenges. *Environmental Pollution*, 116(3), pp. 363–372. Saatavissa: [https://doi.org/10.1016/S0269-7491\(01\)00212-3](https://doi.org/10.1016/S0269-7491(01)00212-3).

Brown, S. & Zarin, D. (2013). What Does Zero Deforestation Mean? *Science*, 342(6160), pp. 805–807. Saatavissa: <https://doi.org/10.1126/science.1241277>.

Cai, L. & Zhu, Y. (2015). The Challenges of Data Quality and Data Quality Assessment in the Big Data Era. *Data Science Journal*, 14, pp. 2–2. Saatavissa: <https://doi.org/10.5334/dsj-2015-002>.

Euroopan parlamentti (2017). Ilmastonmuutos: Miten me pit haluavat sisällyttää metsät ilmastotalkoisiin. Saatavissa (viitattu 2.10.2023): <https://www.europarl.europa.eu/news/fi/headlines/society/20170711STO79506/ilmastonmuutos-miten-mepit-haluavat-sisallyttaa-metsat-ilmastotalkoisiin>.

Fink, A. (2019). *Conducting Research Literature Reviews: From the Internet to Paper*. SAGE Publications.

Ippc (2022). *Global Warming of 1.5°C: IPCC Special Report on Impacts of Global Warming of 1.5°C above Pre-industrial Levels in Context of Strengthening Response to Climate Change, Sustainable Development, and Efforts to Eradicate Poverty*. 1st edn. Cambridge University Press. Saatavissa: <https://doi.org/10.1017/9781009157940>.

Katal, A., Wazid, M. and Goudar, R.H. (2013). Big data: Issues, challenges, tools and Good practices. Sixth International Conference on Contemporary Computing (IC3). Noida, India: IEEE, pp. 404–409. Saatavissa: <https://doi.org/10.1109/IC3.2013.6612229>.

Maa- ja metsätalousministeriö. Metsien taloudellinen merkitys. Saatavissa (viitattu 2.10.2023): <https://mmm.fi/metsat/metsatalous/metsatalouden-kestavyys/metsien-taloudellinen-merkitys>

McColl, R.W. (2014). *Encyclopedia of World Geography*. Infobase Publishing.

Metsälaki (1996). L 12.12.1996/1093. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1996/19961093#L2P5>

Metsävarat. Luonnonvarakeskus. Saatavissa (viitattu 23.11.2023): <https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsavarat>.

Metsävarat maakunnittain. Luonnonvarakeskus. Saatavissa (viitattu 23.11.2023): <https://www.luke.fi/fi/tilastot/metsavarat/metsavarat-maakunnittain-6>.

Moges, H.-T., Vlasselaer, V., Lemahieu, W. & Baesens, B. (2016). Determining the use of data quality metadata (DQM) for decision making purposes and its impact on decision outcomes — An exploratory study. *Decision Support Systems*, 83, pp. 32–46. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.dss.2015.12.006>.

Nadkarni, P.M. (2011). *What Is Metadata? Metadata-driven Software Systems in Biomedicine: Designing Systems that can adapt to Changing Knowledge*. London: Springer

(Health Informatics), pp. 1–16. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-0-85729-510-1\\_1](https://doi.org/10.1007/978-0-85729-510-1_1).

Patenaude, G., Milne, R. & Dawson, T.P. (2005). Synthesis of remote sensing approaches for forest carbon estimation: reporting to the Kyoto Protocol. *Environmental Science & Policy*, 8(2), pp. 161–178. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.12.010>.

Petrokofsky, G., Holmgren, P. & Brown, N.D. (2011). Reliable forest carbon monitoring – systematic reviews as a tool for validating the knowledge base. *International Forestry Review*, 13(1), pp. 56–66. Saatavissa: <https://doi.org/10.1505/146554811798201161>.

Saastamoinen, O., Kniivilä, M., Alahuhta, J., Arovuori, K., Kosenius, A.-K., Horne, P. et al. (2014). *Yhdistävä luonto: ekosysteemipalvelut Suomessa*. 2014(15), s. 203.

Smith, P., Soussana, J.-F., Angers, D., Schipper, L., Chenu, C., Rasse, D. et al. (2020). How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology*, 26(1), pp. 219–241. Saatavissa: <https://doi.org/10.1111/gcb.14815>.

Stockmann, U., Adams, M., Crawford, J., Field, D., Henakaarchchi, N., Jenkins, M. et al. (2013). The knowns, known unknowns and unknowns of sequestration of soil organic carbon. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 164, pp. 80–99. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2012.10.001>.

Valtioneuvosto (2021). *Suomi mukana Glasgow'n metsäjulistuksessa*. Saatavissa (viitattu 2.11.2023): <https://valtioneuvosto.fi/-/1410903/suomi-mukana-glasgow-n-metsajulistuksessa>.

Valtakunnan metsien inventointi (VMI) - kuvaus. Luonnonvarakeskus. Saatavissa (viitattu 2.11.2023): <https://www.luke.fi/fi/seurannat/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi-kuvaus>.

Vardon, M., Castaneda, J.-P., Nagy, M. & Schenau, S. (2018). How the System of Environmental-Economic Accounting can improve environmental information systems and data quality for decision making. *Environmental Science & Policy*, 89, pp. 83–92. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.07.007>.

Vekuri, H., Tuovinen, J.-P., Kulmala, L., Papale, D., Kolari, P. & Aurela, M. (2023). A widely-used eddy covariance gap-filling method creates systematic bias in carbon balance estimates. *Scientific Reports*, 13(1), pp. 1–9. Saatavissa: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-28827-2>.

Wang, R.Y. & Strong, D.M. (1996). Beyond accuracy: What data quality means to data consumers. *Journal of Management Information Systems: JMIS*, 12(4), p. 5.

Zhang, X., Zhao, Y., Ashton, M. & Lee, X. (2012). *Measuring Carbon in Forests. Managing Forest Carbon in a Changing Climate*. Dordrecht: Springer Netherlands, pp. 139–164. Saatavissa: [https://doi.org/10.1007/978-94-007-2232-3\\_7](https://doi.org/10.1007/978-94-007-2232-3_7).