



HELSINGIN YLIOPISTO  
MAATALOUS-METSÄTIETEELLINEN TIEDEKUNTA

# **Harvennuspoistuman keskijäreyden ja tukkiprosentin ennustaminen metsävaratiedosta puutavarain hinnoittelua varten**

Eemeli Kokkonen

Maisterintutkielma

Helsingin yliopisto

Metsätieteiden maisteriohjelma

Metsien ekologia ja käyttö

Joulukuu 2023

Tiedekunta/Osasto Fakultet/Sektion – Faculty Maatalous-metsätieteellinen tiedekunta		Laitos/Institution– Department Metsätieteiden osasto, metsätieteiden maisteriohjelma	
Tekijä/Författare – Author Eemeli Kokkonen			
Työn nimi / Arbetets titel – Title Harvennuspoistuman keskijäreiden ja tukkiprosentin ennustaminen metsävaratiedosta puutavaran hinnoittelua varten			
Oppiaine /Läroämne – Subject Metsien ekologia ja käyttö			
Työn laji/Arbetets art – Level Maisterintutkielma		Aika/Datum – Month and year Joulukuu 2023	Sivumäärä/ Sidoantal – Number of pages 60
Tiivistelmä/Referat – Abstract			
<p>Puukaupassa eletään monen syyn seurauksena muutoksen aikaa. Entistä kehittyneempi kaukokartoituspohjainen metsävaratieto, muuttuva metsänomistajarakenne sekä puun noussut kysyntä antavat mahdollisuuksia kehittää, mutta myös pakottavat muuttamaan puukaupan vakiintuneita menetelmiä. Runkohinnoittelun, eli puutavaralajien katkonnasta riippumaton puun hinnoittelutapa on kasvattanut nopeasti osuuttaan markkinoilla. Samanaikaisesti metsävaratiedon tarkkuus on lisääntynyt uuden laserkeilauskieroksen myötä, ja kilpailu uusiutuvasta puuraaka-aineesta kasvanut sekä energia- että teollisuuskäytössä maailmanlaajuisten megatrendien ja Venäjän aloittaman hyökkäyssodan aiheuttaminen maailmankaupan muutosten seurauksena.</p> <p>Metsäkeskus tuottaa avointa metsävaratietoa, joka on saatavissa metsätalouden operatiivisen suunnittelun tueksi erilaisiin metsäjärjestelmiin. Tieto on nopeaa ottaa käyttöön, objektiivista, ajantasaistettua sekä vartuneissa metsissä luotettavaa. Tutkimuksessa käytettiin tätä avointa tietoa kuvioina vuoden 2020 ajantasaistetussa muodossa. Referenssiaineiston muodostivat 114 korjuulohkoa, joiden harvennuspoistuman keskijäreys ja puutavaralajijakauma tiedettiin hakkuukoneen mittaustietojen perusteella. Lohkot olivat työn tilaajan, Skogsvårdsföreningen Österbotten rf:n puunkorjuuyhtiön hakkaamia. Tutkimuksessa etsittiin parhaat selittäjät ja luotiin mallit poistuman keskijäreiden ja tukkiprosentin ennustamiseksi metsävaratiedosta harvennushakkuulla. Lisäksi selvitettiin yllä mainittujen tunnusten ennustettavuus eri järeyksillä. Ennusteiden tilastolliset tunnusluvut laskettiin ja mallien käytännön sovellettavuutta arvioitiin.</p> <p>Tulokseksi saatiin, että etenkin poistuman keskijäreys kyetään ennustamaan jopa suhteellisen vanhasta metsävaratiedosta sen verran tarkasti, että mallien käyttöä voisi kokeilla puunhankinnan operaatioissa. Ennalta tunnetun mukaisesti ennustaminen oli luotettavaa vartuneemmissa puustoissa. Keskijäreiden osalta paras selittäjä oli metsävaratiedon summapuuston keskiläpimitta, johon pohjautuva malli ennusti hakkuussa toteutuneen keskijäreiden alle 10 % suhteellisella ennustevirheellä. Tukkiprosenttia kyettiin ennustamaan vastaavalla tavalla, mutta aineiston vähäisen tukkikertymän vuoksi mallien ennusteet eivät olleet kovinkaan luotettavia. Molempien vastemuuttujien tapauksessa mallien selitysasteet jäivät noin 50 %:n tasolle. Tulokset olivat osittain kuvioittaisen maastoarvioinnin yleisinä pidettyjä virhemarginaaleja parempia, sekä toteuttajasta riippumattomia. Tulokset olivat siten kuitenkin rohkaisevia ja tukevat kaukokartoitetun metsävaratiedon entistä laajempaa soveltamista tulevaisuudessa.</p>			
Avainsanat – Nyckelord – Keywords Kaukokartoitus, metsävaratieto, puunkorjuu, puutavaran hinnoittelu, harvennushakkuu			
Säilytyspaikka – Förvaringställe – Where deposited Helsingin yliopiston kirjasto – Helda / E-thesis (opinnäytteet) ethesis.helsinki.fi			
Ohjaajat – Handledare – Supervisors Jori Uusitalo ja Mikko Niemi (Helsingin yliopisto)			

## ALKUSANAT

Pro gradu-työn tekeminen on tutkimustyöskentelyn harjoittelua. Samalla se on opintojen loppuvaiheen kypsyysnäyte ja siten olennainen osa opintoja ja metsänhoitajan osaamista. Tällaista projektia ei olisi mahdollista toteuttaa ilman kokeneempien apua ja ohjausta. Alla kiitoksen sana heille, jotka ovat tässä työssä erityisesti auttaneet eteenpäin.

Kiitän metsäteknologian ja logistiikan professori Jori Uusitaloa ja tutkija Mikko Niemeä Helsingin yliopistosta työn ohjaamisesta. Kiitokset kärsivällisyydestä ymmärtää ajatuk-  
siani ja kysymyksiäni sekä avusta ongelmatilanteista yli pääsemisessä. Kiitokset kuuluvat myös Pauli Rintalalle Maataloustuottajain Keskusliitosta sekä Jan Slottelle ja Jessica Grankullalle Metsänhoitoyhdistys Österbotten rf:stä hyvistä neuvoista, työn viitekehyy-  
sen ja rahoituksen järjestämisestä sekä aineiston luovuttamisesta. Ilman teitä tästä ei olisi tullut mitään.

Skogsvårdsföreningen Österbotten rf on metsänhoitoyhdistys, jonka tehtävät on määri-  
telty Laissa metsänhoitoyhdistyksistä (1998). Yhdistys on metsänomistajien hallinnoima ja rahoittama yhteisö, joka toimii paitsi metsänomistajien etujärjestönä mutta myös met-  
sätalouden palveluntarjoajana ja aktiivisena toimijana. Metsänhoitoyhdistykset ja Maata-  
loustuottajain Keskusliitto MTK takaavat toiminnallaan yksityismetsätalouden harjoitta-  
misen edellytykset vaikuttamalla sekä kansallisella että EU-tasolla metsäalaa koskevaan  
päätöksentekoon ja avustamalla ja neuvomalla metsänomistajia heitä askarruttavissa ky-  
symyksissä. Yhdistyksen toiminta-alue kattaa lähes koko Pohjanmaan maakunnan (pl.  
Jepua ja Laihia), ja Kokkolan seudun ruotsinkielisen alueen Keski-Pohjanmaan maakun-  
nasta. Yhdistyksessä työskentelee vakituisesti 32 toimihenkilöä ja sen liikevaihto vuonna  
2022 oli n. 20 miljoonaa euroa. Jäseniä on noin 10 000 kpl.

Skogsvårdsföreningen Österbotten rf:n operatiiviseen toimintaan kuuluu muiden yhdis-  
tysten tavoin puukauppojen kilpailuttaminen, mutta myös oma aktiivinen puunkorjuu ja  
puun vienti mm. länsirannikon satamista oman puukauppayhtiön, Österbottens Trä Ab  
Pohjalaisten Puu Oy:n kautta. Tämä työ on laadittu näiden puukauppapalveluiden kehit-  
tämistä varten, mutta myös kaukokartoitetun metsävaratiedon hyödyntämisen uusien so-  
vellutusten löytämiseksi.

Kristiinankaupungissa 6.12.2023

# Sisällysluettelo

Alkusanat.....	2
1. Johdanto.....	5
1.1 Tausta.....	5
1.2 Tavoitteet.....	7
1.3 Tutkimuskysymykset.....	7
2. Kaukokartoitus ja metsävaratieto.....	9
2.1 Laserkeilaus.....	9
2.1.1 Laserkeilauksen tarkkuus ja virhelähteet.....	11
2.2 Ilmakuvaus.....	12
2.3 Metsävaratieto – tietoa metsistä eri tarkoituksiin.....	14
2.3.1 Valtakunnan metsien inventointi.....	14
2.3.2 Muut metsävaratietoaineistot.....	15
2.3.3 Metsäkeskuksen tuottama avoin metsävaratieto.....	16
3. Puunhankinta ja puun hinnoittelu.....	19
3.1 Puun osto, erilaiset puukaupan toimijat ja puukauppatavat.....	19
3.2 Puunkorjuu ja lähikuljetus.....	22
3.3 Puutavaran kaukokuljetus ja tehdasvastaanotto.....	23
3.4 Puunkorjuun tuottavuus- ja kustannustekijät.....	24
3.4.1 Hakkuun ja lähikuljetuksen tuottavuus ja kustannukset.....	24
3.5 Puun hinnoittelumenetelmät ja puutavaralajit.....	26
4. Aineisto ja menetelmät.....	30
4.1 Käytetyt aineistot.....	30
4.2 Aineiston hankinta ja kelpolisten havaintoyksiköiden otanta.....	31
4.3 Aineiston käsittely ja mallinnus.....	36
4.3.1 Mallien valinta, testaus ja ennusteet.....	38
5. Tulokset.....	40
5.1 Aineistojen tunnusluvut.....	40
5.2 Mallit poistuman keskijäreyden ja tukkiprosentin ennustamiseen.....	41
5.3 Harvennuspoistuman keskijäreyttä ja tukkiprosenttia ennustavien mallien hyvyys riippumattomassa testiaineistossa.....	42
5.4 Selitettävä yhteys järeissä ja pienissä puustoissa.....	45
6. Tulosten tarkastelu ja johtopäätökset.....	47
6.1 Aineisto.....	47

6.2 Tutkimusmenetelmä .....	49
6.3 Tulokset .....	50
6.4 Johtopäätökset.....	52
7. Lähteet .....	54

# 1. JOHDANTO

## 1.1 Tausta

Puukauppaa on jo pitkään käyty hinnoittelemalla jokainen leimikon puutavaralaji erikseen – kuitupuulle, tukkipuulle ja mahdollisille muille katkotuille puutavaralajeille on ollut perinteisesti oma yksikköhintansa (Malinen ym. 2015, Luonnonvarakeskus 2020). Viime vuosina on tullut esiin tarpeita uudistaa hinnoittelua. Puutavaran runkohinnoittelu, eli katkonnasta riippumattoman hinnan määrittäminen kaupan kohteena olevalle leimikolle on yleistynyt (Maaseudun Tulevaisuus 2021). Runkohinnoittelussa yleensä puulajeittain määritetään puutavaralle hinta (€/m<sup>3</sup>), eivätkä toteutuneen katkonnan puutavaralajien suhteet vaikuta metsänomistajalle maksettavaan puukauppatuloon.

Runkohinnoittelun kehittäminen alkoi sahatteollisuudesta ja päätehakkuista, kun huomattiin, että runkohinnoittelemalla puukaupan metsäyhtiö kykenee katkomaan leimikon puut juuri sen hetken pituus-läpimitta-yhdistelmätarpeen mukaisesti. Runkohintakaupassa ostajan ei tarvitse sitoutua puutavaralajikaupan tapaan tiettyihin mitta- ja laatuvaatimuksiin, vaan se voi katkoa puut parhaaksi katsomallaan tavalla. Päätehakkuulla poistuvan puuston laadun ja hakkuukertymän määrittely on helpompaa kuin harvennuksella, joten myös siksi uutta kauppatapaa ryhdyttiin aluksi käyttämään tukkipuuta sisältävissä päätehakkuuleimikoissa. Runkohinnoittelun etu myyjän kannalta on puukaupan ehtojen yksinkertaisuus ja läpinäkyvyys – myyjän ei tarvitse runkohinnoittelussa puukaupassa seurata ja tarkastaa katkotun puutavaran jakautumista eri hintaisiin puutavaralajeihin tai tiettyjen tukkimittojen käyttöä leimikolla, koska kaikesta puutavarasta maksetaan sama hinta (Malinen & Kilpeläinen 2013). Runkohintakaupan hinnoittelu on yksinkertaista jopa metsäalan termistöön perehtymättömälle metsänomistajalle. Puukauppatulojen arviointi on myös helpompaa, sillä yksikköhinnan lisäksi tarvitsee arvioida vain poistuvan puuston kokonaistilavuus, mikä on huomattavasti tarkempaa kuin useamman puutavaralajin välisten suhteiden arviointi etukäteen. Metsänomistajat tulevat entistä enemmän perinteisten maaseutuelinkeinojen ulkopuolelta, joten puukaupan yksinkertaistaminen ja läpinäkyvyyden kasvattaminen ovat tulevaisuudessa yhä enemmän tarpeen, jotta kasvavaan puun tarpeeseen voidaan vastata.

Runkohinnoittelun haasteita ovat mm. se, että puuston mittaaminen etukäteen on epätarkkaa, varsinkin harvennushakkuilla. Mahdollisia sisäisiä vikoja, kuten lahoa, ei voida tunnistaa ennen puun kaatamista, ja lisäksi harvennuksella kuljettajan tekemä puuvalinta ohjaa poistuman ominaisuuksia merkittävästi ennakoarviosta riippumatta. Puuston tukkiprosentin arvioiminen pystypuustosta on myös hankalaa, ja usein arvio perustuukin silmänvaraiseen arviointiin tai nopeaan koealaotantaan läpimittojen perusteella. Runkohinnoittelussa puukaupassa tukkiprosentin etukäteismäärittelyn tarkkuus on olennaista, koska se vaikuttaa tarjottavaan hintaan merkittävästi. Puutavaralajeittain hinnoitellussa kaupassakin tukkiosuuden määrittely tehdään, mutta ostaja maksaa puista kuitenkin toteutuneen katkonnan mukaisesti. Runkohinnoitellussa kaupassa ostaja kantaa riskin, mikäli arvio menee pieleen. Metsänomistajalle maksetaan ennen leimikon hakkuuta määritetty yksikköhinta toteutuneesta katkonnasta riippumatta.

Puutavaralajijakauman lisäksi toinen suuri epävarmuustekijä on puuston keskijäreys eli poistuvan rungon keskimääräinen tilavuus. Puunkorjuutyö hinnoitellaan usein keskijäreiden mukaan, joten myös sen arviointi pystypuustosta pitäisi olla hyvin tarkkaa, jotta metsänomistajalle tarjottavan kantohinnan määrittely onnistuisi. Jälleen haasteet ovat suurempia harvennuksella, sillä poistuvia puita voi vain arvailla ennen leimikon hakkuuta. Siksi maastossa suoritettava koealaotannan käyttökin on keskijäreiden määrittelyssä hankalaa.

Haasteistaan huolimatta Maa- ja metsätaloustuottajain Keskusliitto MTK on vaatinut runkohinnoittelua puukaupan hinnoittelujärjestelmäksi jo yli kaksi vuosikymmentä sitten (Ala-Fossi 2003). Myös Maa- ja metsätalousministeriön alainen Puumarkkinatyöryhmä ehdotti osittaiseen runkohinnoitteluun, rungonosahinnoitteluun, siirtymistä Luonnonvarakeskuksenkin selvitettyä asiaa (Uusitalo 2016). MTK on halunnut siirtyä runkohinnoitteluun edustamiensa metsänomistajien oikeusturvan takia. Puutavaralajihinnoittelussa rungon katkonnassa syntyy ristiriita, mikäli yksikköhinnaltaan halvemmille puutavaralajeille on katkontahetkellä suurempi kysyntä tai ostajan puutavaran pituus-läpimittatavoitteet eivät optimoi metsänomistajan kannalta arvokkaimman puutavaralajin maksimaalista katkontaa. Eri optimointitavoitteiden ristiriidan ratkaisisi runkohinnoittelu, jossa katkonnan ohjaaminen suuntaan tai toiseen ei muuttaisi metsänomistajan puukauppatuloa.

Katkontakiistoja on ollut oikeusistuimissa lukuisia vaihtelevin lopputuloksin. Yleisin erimielisyyden aihe on ollut se, että metsänomistaja on epäillyt tukkipuun katkomista halvemmaksi kuitupuuksi.

Hinnoittelutapojen muutospainneiden lisäksi samaan aikaan Metsäkeskuksen tuottaman avoimen metsävaratiedon, joka on myös käytössä ammattilaisten metsäjärjestelmissä pohjatietona, käyttö on laajentunut. Kaukokartoitustieto on objektiivista ja sen käyttäminen maastomittauksia huomattavasti nopeampaa. Kaukokartoitustiedon käyttö puun hinnoittelun pohjana olevien puustotunnusten määrittelyssä voisi paitsi ehkäistä subjektiivisia virheitä, mutta myös vapauttaa kallista maastotyöaikaä esimerkiksi teiden kunnan ja luontokohteiden tarkastamiseen tai muuhun sellaiseen, mitä ei voida tulkitä kaukokartoituksen menetelmin mutta joka on kuitenkin puunkorjuun onnistumiseksi välttämätöntä tietoa. Aiemmat tutkimustulokset kaukokartoitetun metsävaratiedon käyttökelpoisuudesta, tekniikan kehittyminen ja uudet pyrkimykset puukaupassa antavat mielenkiintoisen lähtökohdan tälle tutkimukselle.

## **1.2 Tavoitteet**

Työn tavoite on selvittää, kuinka avoimen metsävaratiedon perusteella voidaan ennustaa harvennuspoistuman keskijäreys ja tukkiprosentti. Työ on tehty Skogsvårdsföreningen Österbotten rf:lle eli Metsänhoitoyhdistys Österbottenille (jäljemmin SvF) sen oman puunkorjuutoiminnan ja puukauppalveluiden kehittämistä varten. SvF on luovuttanut tutkimuksessa tarvittavaa aineistoa. Työ itsessään on tieteellisen tutkimuksen periaatteiden mukaan avointa ja julkista tietoa, mutta SvF:n aineistot ja hinnoittelumenetelmät ym. sisäiset tunnusluvut on määritelty salassa pidettäviksi.

## **1.3 Tutkimuskysymykset**

Tutkimuskysymykset ovat:

1. Kuinka hyvin harvennusleimikon poistuvan puuston keskijäreys ja tukkiprosentti pystytään ennustamaan avoimesta metsävaratiedosta?
2. Löytyykö jotain sellaista yksittäistä avoimen metsävaratiedon tunnusta, joka selkeästi parhaiten selittää poistuvan puuston keskijäreyttä ja/tai tukkiprosenttia?

Entä eri tunnusten yhteisvaikutuksia? Esimerkkeinä puustotunnuksista keskipituus, keskiläpimitta tai lehtipuun osuus.

3. Voidaanko määrittää runkohinnoitteluun soveltuvia/soveltumattomia leimikoita?

## 2. KAUKOKARTOITUS JA METSÄVARATIETO

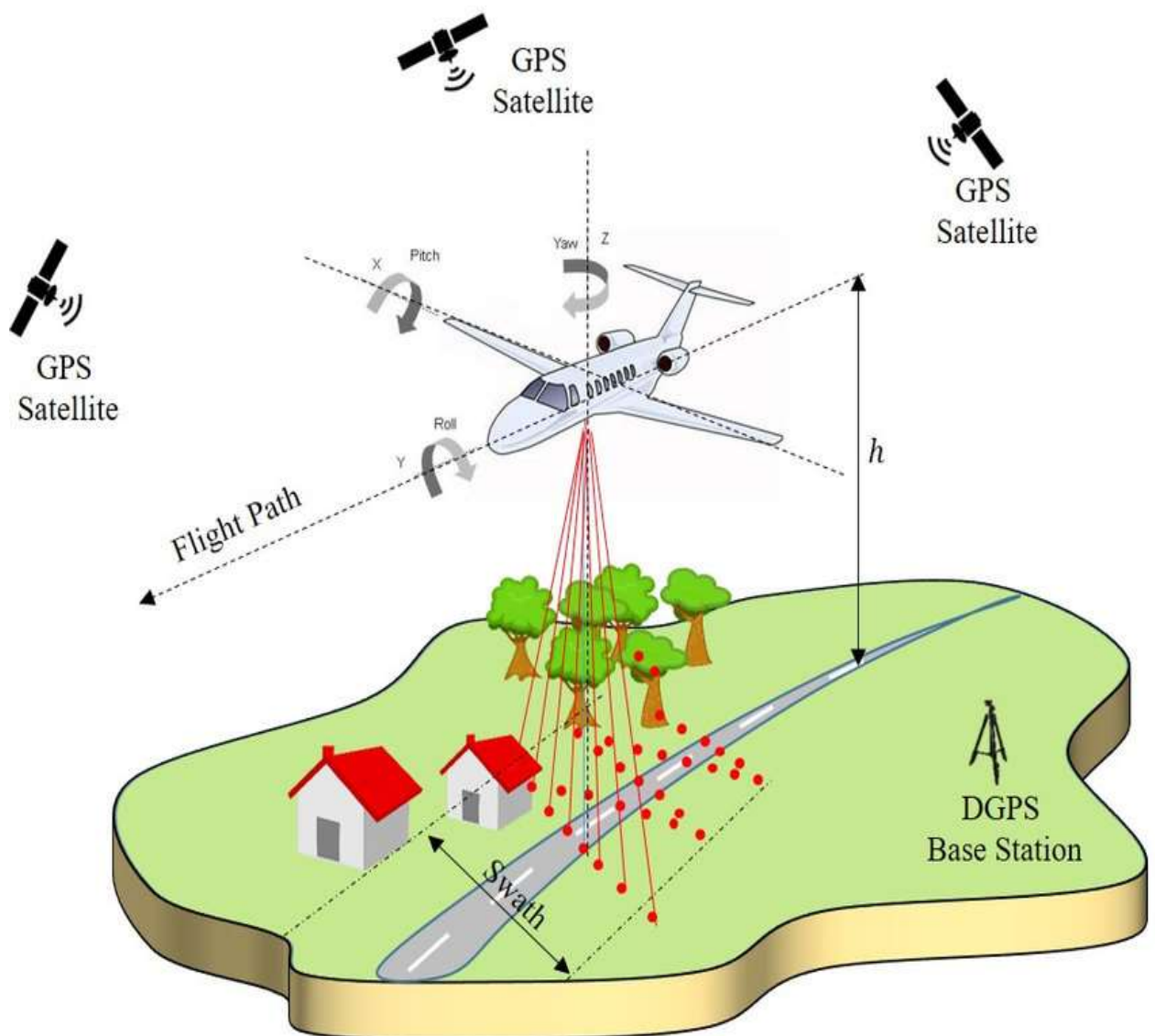
Tämän tutkimuksen olennaisen osan muodostaa Metsäkeskuksen koostama avoin metsävaratieto, joka pohjautuu pitkälti kaukokartoitukseen.

Kaukokartoituksella tarkoitetaan tiedon hankkimista koskettamatta tutkittavaa kohdetta fyysisesti (Holopainen ym. 2015). Holopaisen ym. (2015) oppikirja jakaa kaukokartoitusmenetelmät aktiiviseen ja passiiviseen kaukokartoitukseen. Aktiivisessa menetelmässä jokin säteilylähde, kuten laserkeilain tai tutka lähettää itse pulssia, ja kerättävä tieto saadaan analysoimalla tätä takaisinheijastunutta pulssia. Passiivinen kaukokartoitusmenetelmä havainnoi Auringonvalon heijastumista tutkittavasta kohteesta. Ilmakuvaus tai tavallinen valokuva ovat hyviä esimerkkejä passiivisesta menetelmästä, ne perustuvat valon aallonpituuksien takaisinheijastumiseen, ja säteily on peräisin Auringosta, eikä itse tarkoitusta varten perustetusta lähettimestä. Ilmakuvat ja laserkeilaus ovat nykymuotoisen metsien kaukokartoituksen kaksi pääasiallista tiedonlähdettä (Metsäkeskus 2022b). Kaukokartoitusmenetelmillä saadaan tuotettua tietoa suurilta alueilta nopeasti ja suhteellisen vähäisellä maastotyöllä (Holopainen ym. 2015). Yleisesti maankäyttösektorilla kaukokartoitusta suoritetaan satelliiteilla ja tutkilla, joilla voidaan havaita maankäytön tai ilmasto-olojen muutoksia. Esimerkkinä Landsat-satelliittisarja, joka kuvaa juuri maan pintaa ja määrittää mm. kasvillisuusindeksiä (Hansen & Loveland 2012).

### 2.1 Laserkeilaus

Laserkeilaus (LiDAR=Light Detection and Ranging tai ALS=Airborne Laser Scanning) tuottaa käytännössä kaiken metsävarojen puustotiedon pohjan Suomessa (Metsäkeskus 2022b). Menetelmä tuli 2000-luvulla käyttöön ensimmäisten lupaavien tutkimustulosten tultua julki (Naasset 1997, Hyyppä & Hyyppä 1999), mutta jo 1980-luvulla huomattiin puuston pituuden mittauksen olevan mahdollista lentolasermittauksella (Nelson ym. 1984). Laservalo itsessään on 1950-luvun venäläinen keksintö ja sitä on hyödynnetty alkuun lähinnä sotilaskäytössä, josta käyttö on levinnyt siviilisovellutuksiin, kuten rakennusteollisuuteen ja metsien inventointiin (Holopainen ym. 2015). Metsistä tietoa tuottava Metsäkeskus alkoi tuottaa laserkeilausperusteista metsävaratietoa vuodesta 2010 lähtien (Holopainen ym. 2011).

Laserkeilain koostuu lasertykistä ja ilmaisimesta. Tykki lähettää monokromaattisia eli vain yhtä valon aallonpituutta sisältäviä laservalopulsseja, jotka heijastuvat puustosta ja maanpinnasta takaisin ilmaisimelle. Nykyisin laajemmissa metsävarojen inventoinneissa lentokoneeseen kiinnitetystä keilaimesta lähetetään laservalopulsseja, joiden heijastumisen perusteella ennustetaan puustotunnuksia pulssin aallon vaiheen ja heijastumiseen kulueneen ajan perusteella maastossa mitattuja puuston referenssikoealoja hyödyntäen (Holopainen ym. 2015, Metsäkeskus 2022b). Puuston latvuksesta tulevat ensimmäiset heijastuskaiut ja vastaavasti maanpinnasta viimeiset. Koneen sijainti ja lentokorkeus ja keilauskulma eli lähtevän pulssin kulma kohtisuoraan nähden on tunnettava mittauksen onnistumiseksi.



Kuva 1. Ilmalaserkeilauksen toimintaperiaate (Harikumar 2020).

Laserkeilauksen kaksi päämenetelmää ovat aluepohjainen inventointi ABA (=Area-Based Approach) ja yksinpuintulkinta ITD (=Individual Tree Detection). Puustotunnukset tuotetaan joko puiden fyysikaalisista dimensioista heijastuneen pulssin perusteella tai tilastollisen riippuvuuden avulla maastokoealoista (Holopainen ym. 2011).

Laserkeilauksen kaksi perustuotetta ovat pintamalli eli (DSM=Digital Surface Model) ja maastomalli (DTM=Digital Terrain Model). Metsänmittauksen kannalta mielekäs puuston korkeusmalli (CHM=Canopy Height Model) saadaan, kun vähennetään pintamallista maastomalli eli maanpinnan korkeusmalli (Holopainen ym. 2015). Näin laskettu puuston pituus on jopa maastomittausta tarkempaa, eikä mittauksessa ole subjektiivisuutta. Sano mattakin on selvää, että laserkeilain mittaa laajoja alueita ihmisen tekemää maastomittausta nopeammin, vaikka ilmaisimen koostamat ns. pistepilvet täytyykin jälkikäsitellä ymmärrettävään muotoon.

Metsävarojen inventoimiseksi tehtävä laserkeilaus suoritetaan yleensä 400–4000 m korkeudelta, keilauskulma on 15 astetta ja keilausalueen leveys 100–1000 m (Holopainen ym. 2015). Käytetty pulssitiheys on 0,5–20 pulssia/neliometri. Mitä suurempi pulssitiheys on, sitä tarkempaa tietoa saadaan ja sitä kalliimmaksi keilaus tulee. Toisaalta hinta on halventunut menetelmän yleistyessä.

Laserkeilaus toteutetaan laajempien alueiden inventoinnin tapauksessa aina lentokoneesta tai helikopterista (ALS=Airborne Laser Scanning), mutta itse keilain on mahdollista kiinnittää myös esimerkiksi mönkijään, radio-ohjattavaan lennokkiin, kolmijalkaan tai selkäreppuun. Tällöin on kysymys kuitenkin pienempien, jopa puutason, inventointien tekemisestä. Radio-ohjattavia lennokkeja voidaan vielä käyttää metsätilatasolla esimerkiksi metsäsuunnitelman teon yhteydessä, mutta laajempien alueiden inventointi edellyttää käytännössä lentokoneen käyttöä. Maasta tapahtuva laserkeilaus on nimeltään TLS, eli Terrestrial Laser Scanning.

### ***2.1.1 Laserkeilauksen tarkkuus ja virhelähteet***

Laserkeilauksen tarkkuus on kehittynyt vuosien saatossa niin paljon, että siitä on tullut metsävaratiedon puustotunnusten keruun perusta. Keilaimen pulssitiheyden lisäksi tiedon tarkkuuteen vaikuttavat monet asiat metsikön ominaisuuksista ja keilausolosuhteista pistepilvien käsittelyyn.

Keilaimesta lähtevä pulssi heijastuu ja siroaa puuston viimeistään latvuserroksista alapäin tai esimerkiksi ilman epäpuhtauksista tai vesipisaroista. Siten takaisin heijastuneiden pulssien vastaanottaminen ja käsittely häiriintyy, mitä enemmän heijastuspintoja pulssin matkalla on. Tiheät, hoitamattomat puustot, ovat siksi ongelmallisia laserkeilaukselle. Puuston pituuden ja keskiläpimitan pienentyessä laserdatan tarkkuus heikkenee myös siksi, että ohuet ohuet rungot eivät erotu oksien seasta selkeästi, varsinkin kun puiden runkoluku on samanaikaisesti suuri ja hajaheijastusta paljon.

Laserkeilaus tuottaa maanpinnan ja latvuksen välisenä etäisyytenä puuston pituuden, läpimitan ja muut puustotunnukset estimoidaan. Etenkin läpimitan estimoinnin tarkkuus on tärkeää, koska sen perusteella lasketaan monta muuta tunnusta, kuten puutavaralajijakauma. Muut tunnukset ovat siis vielä epätarkempia, koska ne mallinnetaan pituudesta ja läpimitasta tai niiden tunnetusta yhteydestä laskennallisesti.

Järeissä metsiköissä on kyetty ennustamaan laserkeilaamalla maastomittausta tarkemmin koko metsikön runkolukusarja ja laatutunnuksia (Peuhkurinen ym. 2008, Maltamo ym. 2009). Laserkeilauksella on siis mahdollisuuksia tuottaa erittäin tarkkaa tietoa, mutta valtakunnan tasolla käytettäessä sekä tutkimuskäyttöä alempi pulssitiheys että metsiköiden ja keilausolosuhteiden vaihtelevuus aiheuttavat tuloksiin virhettä. Puustotiedon laatuun aluepohjaisessa menetelmässä, jolla tämän hetken julkinen metsänvaratieto kerätään, vaikuttaa suuresti maastoon sijoiteltujen referenssikoealojen edustavuus, määrä ja mittaus-tarkkuus (Ruotsalainen ym. 2019).

## **2.2 Ilmakuvaus**

Laserkeilauksen lisäksi metsien kaukokartoitustyössä käytetään ilmakuvausta (Metsäkeskus 2022b). Ilmakuvaus on laserkeilausta vanhempi kaukokartoitusmenetelmä, joka suoritetaan niin ikään lentokoneesta, mutta tyypillisesti korkeammalta (7–8 km) kuin laserkeilaus (Metsäkeskus 2022b). Voidaan sanoa, että metsien kaukokartoitus sai alkunsa ilmakuvista, kun esimerkiksi metsikkökuviointia kyettiin tekemään visuaalisena tulkin-tana. Ilmakuvauksessa käytetään tyypillisesti useampaa aallonpituuskanavaa eri käyttö-tarkoitusta varten. Holopaisen ym. (2015) mukaan näkyvän valon (500–700 nm) lisäksi käytössä on erityisesti ns. lähi-infra eli näkyvästä valosta seuraava aallonpituusalue (700–900 nm). Eri aallonpituuksien käyttö johtuu käyttötarkoituksesta. Metsien inventoinnissa

lähi-infraa käytetään puulajitulkintaan, sillä lehtipuut heijastavat Auringon lähi-infra-alueen säteilyä huomattavasti paremmin takaisin kuin havupuut (Holopainen ym. 2015). Lähi-infra-alueen ilmaisinta käytettäessä infrapunasäteily näyttää ihmissilmään punaiselta, mistä lehtivihreä on helppo tunnistaa. Vääräväri-ilmakuva on metsäsuunnittelun taustatyön perustuote, joka löytyy lähes jokaisesta metsäjärjestelmästä ja jopa ilmaisista karttasovelluksista (Tapio Oy 2023). Muualla maankäyttösektorilla on käytössä yleisesti myös muita aallonpituuskanavia eri käyttötarkoituksia varten. Pohjoismaisessa havumetsässä puulajitulkintaan riittää usein lähi-infra, mutta esimerkiksi maatalouden tai merentutkimuksen sovellutuksissa laajempi spektrinen erotuskyky on usein tarpeen erilaisten heijastuspintojen (kasvilajit, saasteet tms.) havainnoimiseksi. Metsäkeskuksen (2022a) mukaan ilmakuvia käytetään puulajitulkinnan lisäksi myös uudishakkuukohteiden seurantaan ja siten metsävaratiedon ajantasaistamiseen.

Kaukokartoitusmenetelmänä yleinen satelliittikuvaus on myös eräänlaista ilmakuvausta, mutta selkeästi korkeampaa, kymmenien tai satojen kilometrien korkeudesta. Satelliittikuvien spatiaalinen resoluutio eli erotuskyky on yleensä lentokoneesta tehtyä ilmakuvausta heikompaa, mutta ajallinen eli temporaalinen resoluutio parempaa, koska kuvaus suoritetaan useammin. Satelliitit kiertävät Maata säännöllisesti, kun puolestaan lentokoneesta tehtävä ilmakuvaus on tilattava erikseen sopivalle mahdollisimman pilvettömälle päivälle. Satelliittikuvien resoluutio riittää hyvin esimerkiksi laittomien tai ilmoittamattomien avohakkuiden paljastamiseen tietyllä aikavälillä, mutta esimerkiksi metsikkökuvion rajojen selvittämiseen erotuskyky ei riitä (esim. Hansen & Loveland 2012, Metsäkeskus 2022a). Satelliittikuvien spatiaalinen resoluutio on mitattavissa metritarkkuudella, kun ilmakuvissa tarkkuus on jopa kymmenien senttimetrien luokkaa (Holopainen ym. 2015).

Nykymuotoiset ilmakuvat otetaan numeerisina eli digitaalisina ja ne voidaan tukipisteiden, kameran kalibroinnin ja maanpinnan korkeusmallin avulla sijoittaa suoraan samaan koordinaatistoon pohjakartan kanssa (Holopainen ym. 2015). Sävyarvoja voidaan tulkita numeerisesti, vaikka merkittävä osa ilmakuvien käytöstä on edelleen visuaalista tulkintaa, kuten tietyn hakkuualueen rajojen selvittämistä.

## 2.3 Metsävaratieto – tietoa metsistä eri tarkoituksiin

Metsävaratieto tarkoittaa tietoa metsistä, esimerkiksi puustosta, hakkuumahdollisuuksista, metsän rahallisesta arvosta tai monimuotoisuudesta. Suomen metsävarat tunnetaan kansainvälisesti verraten erittäin hyvin, jo pelkästään VMI-mittaustietoa eli koealaotantaan perustuvaa valtakunnan metsien inventointia on kerätty yli 100 vuotta (Maa- ja metsätalousministeriö 2023). Metsävaratietoa kerätään metsien käytön suunnittelua ja metsiin liittyvää päätöksentekoa varten. Toisinaan metsävaratiedolla tarkoitetaan vain ja ainoastaan avointa, julkisin varoin tuotettua tietoa. Tällöin tarkempaa, yksityiskohtaista asiakaslähtöistä tietoa kutsutaan metsäsuunnittelutiedoksi, joka on metsävaratiedon käytökelpoisempi jaloste. Julkisin varoin tuotettuja metsävaratietoaineistoja ovat Suomen Metsäkeskuksen keräämä kuviotason metsävaratieto ja valtakuntatason suunnittelua varten kerättävä VMI.

Metsävaratietoa keräävät useat eri tahot eriasteisena eri käyttötarkoituksiin. Tarvetta metsävaratiedolle on suuraluetasolta yksittäisen puun tarkkuuteen menevään tulkintaan. Laajoilla, maakunta- tai valtakuntatason tietoaaineistoilla, kuten VMI:llä on tärkeä rooli kansallisessa metsäpolitiikassa ja strategisen tason metsiin liittyvässä suunnittelussa, kun puolestaan metsätila- ja kuviotason operatiivinen metsävaratieto hyödyttää metsänomistajia ja metsätalouden käytännön toimijoita, kuten puunostajia (Luonnonvarakeskus 2023a). Tutkimuskäyttöön voidaan tarvita myös tietoa yksittäisen puun tarkkuudella. Metsävaratiedon tarkkuudessa, saatavuudessa ja keräystavassa on siis eroja sen mukaan, mitä varten tietoa tullaan käyttämään.

### 2.3.1 Valtakunnan metsien inventointi

VMI perustuu tilastolliseen maastossa mitattujen koealojen otantaan ja satelliittikuviin (Luonnonvarakeskus 2023a). Koealoja mitataan ryppäittäin eri puolilla Suomea. Luonnonvarakeskus tuottaa inventoinnin tuloksena kuntakohtaisen metsävaratietoaineiston ja maankattavan laskennallisen hakkuumahdollisuusarvion. VMI-tieto on myös ennen kaikkea seurantatutkimusta, sillä inventointia on tehty vuodesta 1921 asti (Luonnonvarakeskus 2023a). VMI on esimerkki laajan kattavuuden suuren mittakaavan metsävaratiedosta, joka soveltuu arvioiden tekemiseen kuntatasosta laajemmilla alueilla ja perustavanlaa-

tuisten muutosten havaitsemiseen. VMI:n tuloksista nähdään metsien kehityksen päälinjat, esimerkiksi kasvun ja tilavuuden muutokset, metsien terveyden yleistila tai puulajien suhteiden vaihtelu (Luonnonvarakeskus 2023a). VMI-tulokset ovat saatavissa Luonnonvarakeskuksen tilastopalvelusta, mutta esimerkiksi koealapisteet eivät ole julkista tietoa korruptoitumattomamman otannan saavuttamiseksi.

### ***2.3.2 Muut metsävaratietoaineistot***

Tarkempaa metsätila- ja kuviotason operatiivista metsäsuunnittelutietoa ovat perinteiset kuvioittaiseen arviointiin perustuvat metsäsuunnitelmat. Metsäsuunnitelmia voidaan tehdä maastossa mittaamalla puustotunnuksia, kuten pituutta, pohja-pinta-alaa ja keskilämpimittaa, mutta nykyisin myös maastotyö suunnitellaan hyvin pitkälle etukäteen kaukokartoitusaineistojen avulla (Tapio Oy 2023). Ilmakuvista voidaan suorittaa ennakkokuviointi visuaalisesti, ja laserkeilausdata antaa hyvän lähtökohdan puustotunnusten ja edelleen toimenpide-ehdotusten määrittämiseksi. Parhaimmillaan maastossa lähinnä tarkastetaan kaukokartoitetun tiedon laatua. Yllä kuvatulla toimintatavalla voidaan läpikäydä kohtuullisessa ajassa jopa tuhansia hehtaareja metsämaata ja määrittää tarkat toimenpidesuunnitelmat metsikkökuvioittain esimerkiksi 10 vuoden ajalle. Mikäli riittävän tuoreita ilmakuvia tai laseraineistoja ei ole saatavilla, voidaan ne kerätä esimerkiksi dronella tai tilata erikseen lentoinventointi. Lentokoneesta suoritettava ilmakuvaus tai laserkeilaus tulee kysymykseen, mikäli halutaan erittäin tarkkoja tuloksia ja inventointiala on tuhansia hehtaareja. Esimerkiksi Metsähallitus ja metsäyhtiöt teettävät omia laserkeilauksia, koska pinta-alat ovat riittävän suuria ja Metsäkeskuksen tehtäviin kuuluu kerätä tietoa lähinnä yksityismetsistä.

Tutkimuskäyttöön voidaan tuottaa esimerkiksi koealametsiköstä maastolaserkeilaimella 3D-mallinnus. Suurella pulssitiheydellä päästään erittäin tarkkoihin tuloksiin, ja jopa puiden kasvua, laatua ja terveyttä voidaan mitata laserkeilaimella (esim. Maltamo ym. 2009, Junttila 2019). Samoilla menetelmillä - maastomittauksilla, laserkeilaimella ja ilmakuvilla, voidaan siis tuottaa hyvin eritasoista metsävaratietoa.

### ***2.3.3 Metsäkeskuksen tuottama avoin metsävaratieto***

Metsäkeskus on valtion viranomais- ja asiantuntijataho kestävänsä metsätalouden edistämistä varten. Metsäkeskus tuottaa julkisella rahoituksella tietoa yksityismetsistä. Metsäkeskuksen tehtäviin kuuluu metsävara- ja luontotiedon tuottamisen lisäksi myös yleinen metsäalan riippumaton neuvonta, metsälain valvonta sekä metsätalouden tukijärjestelmän ylläpitäminen (Metsäkeskus 2023). Metsäkeskus ylläpitää Metsään.fi-palvelua, jossa metsänomistajat voivat tarkastella metsävaratietoja ja esimerkiksi lähettää tukihakemuksia.

Metsäkeskuksen merkittävin painopiste on avoimen metsävaratiedon tuottamisessa ja jakamisessa (Metsäkeskus 2023). Vuoteen 2010 metsävaratieto kerättiin maastotyönä kuvioittaisena arviointina, mutta siitä eteenpäin käytössä on ollut kaukokartoitusperustainen menetelmä (Metsäkeskus 2020). Ensimmäisen kymmenen vuoden aikana inventointi saatiin tehtyä koko maahan, jonka jälkeen aloitettiin uusi inventointikierrös, jonka on määrä päättyä 2026 pohjoisinta Lappia lukuun ottamatta (Metsäkeskus 2022a). Laserkeilauksen ja ilmakuvauksen hoitavat siihen erikoistuneet yhtiöt, ja niiden toteuttamista koordinoi Maanmittauslaitos. Laserkeilauskorkeus on Metsäkeskuksen inventoinnissa 1,5–2 km ja ilmakuvauksen 7–8 km. Vuodesta 2020 lähtien laserkeilauksen pulssitiheys on ollut 5 pulssia/m<sup>2</sup>, joka on kymmenkertainen aiempaan, ensimmäiseen laserkeilauskierrokseen verrattuna (Maanmittauslaitos 2023).

Kaukokartoitusaineistojen, laserkeilauksen ja ilmakuvien, lisäksi tarvitaan maastossa mitattuja referenssikoealoja. Metsäkeskuksen mukaan (2022a) Suomi on jaettu noin 300 000 ha kokoisiin inventointiyksiköihin, joita kyetään mittaamaan nykyisellä toisella inventointikierröksellä 22 kpl/vuosi. Laserkeilaus tehdään keväällä, ilmakuvaukset ja referenssikoealojen mittaus kesällä. Koealan säde on 9 metriä ja niitä mitataan 700–800 kpl (Metsäkeskus 2022a). Vaihtoehtoisesti voidaan käyttää suurempia kaukokartoitusperusteisesti sijoitettuja ns. puukarttakoealoja. Kevään ja kesän inventointien jälkeen syksyllä ja talvella estimoidaan metsävaratieto valmiiksi tietotuotteiksi, eli inventointihetken puustotiedon sisältäväksi hila-aineistoksi ja metsänvarakuvioiksi, joita tässäkin tutkimuksessa käytetään.

Inventoinnin perusyksikkö on rasterimallinen 16 m \* 16 m hilaruutu, jolle estimoidaan pohjapinta-ala, keskipituus, keskiläpimitta, runkoluku, tilavuus ja ikä (Holopainen ym.

2015). Puustotunnukset estimoidaan hilaruudulle laserkeilaus- ja ilmakeilaus-aineiston perusteella parhaiten sopivista maastoreferenssikoealoista (Metsäkeskus 2022a). Puustotunnukset lasketaan puusto-ositteittain, joita ovat mänty, kuusi ja lehtipuu.

Metsävarakuvioaineisto koostuu hilaruuduista keskiarvoistamalla saaduista vektorikuvioista, jotka pyritään saamaan yli 0,5 ha suuruisiksi (Metsäkeskus 2022a). Kuviointiin eli kuvioiden geometriaan vaikuttavat mm. hilaruutujen puustotunnukset, ilmakeilauksen tulkinointi, metsänkäyttöilmoitukset ja kiinteistöjaotus. Puustotunnukset kuvioille tulevat siis kuvion sisälle jäävistä hila-aineiston hilaruuduista, mutta myös kasvumallista ja mahdollisista metsänkäyttöilmoituksista (Metsäkeskus 2021; Metsäkeskus 2022b). Kuvion sisälle kokonaan jäävillä ruuduilla on suurempi painoarvo laskennassa, kuin vain osittain kuvion sisällä olevilla. Esitystavan lisäksi merkittävin ero hila- ja metsävarakuvioaineiston välillä on siinä, että hila-aineisto sisältää inventointitietoa, kun puolestaan metsävarakuvioita ajantasaistetaan kasvumallilla ja Metsäkeskukseen saapuvalla tiedolla, kuten Kemera-tukihakemuksilla ja metsänkäyttöilmoituksilla. Kuvioille tuotetaan puustotunnusten perusteella myös seuraava toimenpide-ehdotus. Metsävarakuvioaineistossa on puustotiedon lisäksi tietoa mm. kasvupaikasta, iästä ja ojitustilanteesta, joka on peräisin puustotunnusten laskennallisesta mallinnuksesta, suoraan referenssikoealoilta, vanhasta kuvioittaisesta arvioinnista tai jossain tapauksessa ulkopuolisesta metsäsuunnittelutiedosta. Laserkeilauksen ja muun kaukokartoituksen käytettävyyden rajoitus fyysisesti mitattaviin tunnuksiin, muiden kuviotietojen estimointi on aina laskennallinen johdannainen esimerkiksi pituudesta tai läpimitasta maastoon sijoitettujen referenssikoealojen avulla.

Metsäkeskuksen metsävaratiedon tavoitetarkkuus on määritelty tunnuksittain: pohjapinta-ala  $\pm 3 \text{ m}^2/\text{ha}$ , keskiläpimitta  $\pm 3 \text{ cm}$ , keskipituus  $\pm 2 \text{ m}$ , ja keskitilavuus  $\pm 20 \%$  kahdeksassa tapauksessa kymmenestä kasvatus- ja uudistuskypsissä metsissä (Metsäkeskus 2022a). Iän määrittäminen kaukokartoitusperusteisesti on ongelmallista ja epätarkkaa, mutta toisaalta sen merkitys on metsälain uudistamisen myötä pienentynyt, kun uudistamiskriteereitä ei ole uudessa laissa sidottu ikään. Kaukokartoituksen perustoimintaperiaatteesta seuraa, että keskipituus on tarkin tunnus, ja kaikki siitä johdettu, erityisesti pohjapinta-ala, on epätarkempaa. Johdettujen tunnusten lisäksi suurin metsävaratiedon haaste liittyy puulajitulkintaan, ja tavoitteeksi onkin asetettu se, että vallitseva pääpuulaji kuviolla saataisiin oikein (Metsäkeskus 2022a). Laserkeilauksen toimintaperiaatteesta

seuraa luonnollisesti myös se, että puuston koon pienentyessä tarkkuus heikkenee. Tarkkuuden alenemista selittää siksi myös taimikoiden hoitamattomuus, joka vääristää erityisesti runkolukua ja puulajitulkintaa (Metsäkeskus 2022a). Toimenpidetarpeen määrittämiseen heikko runkolukuestimaatti tai pääpuulaji taimikoissa ei luonnollisestikaan vaikuta, vaan ne ohjautuvat oikein taimikonhoitotarpeen piiriin. Puunkorjuun suunnittelua ajatellen pienipuustoiset ja hoitamattomat metsät muodostavat sen sijaan suuren epäjatkuvuuskohdan.

### **3. PUUNHANKINTA JA PUUN HINNOITTELU**

Puunhankinta voidaan määritellä joukoksi operaatiota, jotka muodostavat raakapuun toimitusketjun metsästä puun käyttöpaikalle teollisuuteen tai energiantuotantoon (Uusitalo 2004). Puunhankinnan operaatiot, eli toimenpiteet ja niiden ketjut, ovat puun osto, puunkorjuu, kaukokuljetus ja vastaanotto käyttöpaikalla (Uusitalo 2004). Laajemmin puunhankinta tarkoittaa kaupallisia ja teknisiä toimenpiteitä, joita tekemällä oikeanlaatuinen puuraaka-aine saadaan käyttöpaikalle minimikustannuksin (Kivinen 2022). Puunhankinta on kokonaisuus, joka tapahtuu ennen varsinaista puunjalostusprosessia.

#### **3.1 Puun osto, erilaiset puukaupan toimijat ja puukauppatavat**

Puunhankinta alkaa puukaupasta eli puun tai sen hakkuuoikeuden ostamisesta. Suomessa valtaosan metsistä omistavat noin 600 000 yksityismetsänomistajaa, joiden kanssa tehtävä puukauppa muodostaa puun oston perinteisen rungon (Metsäkeskus 2023b). Puukauppa juridisesti on kaupankäyntiä siinä missä mikä tahansa muukin myynti ja osto, eikä sille ole erikseen lainsäädäntöä, toisin kuin esimerkiksi puutavaran mittaukselle tai metsätuhojen ehkäisemiselle (Kontinen ym. 2019). Yksityismetsänomistajien lisäksi puun myyjiä ovat esimerkiksi valtion metsiä hallinnoiva Metsähallitus metsätalouslyhtiönsä Metsätalous Oy:n kautta, kaupungit ja kunnat, seurakunnat ja muut yhteisöt sekä metsänomistajien yhteenliittymät. Ostajapuolella ovat puunjalostajat eli metsäyhtiöt sekä myös puunvälitystoimintaa harjoittavat yhtiöt, kuten tämän tutkimustyön tilaaja metsänhoitoyhdistys Österbotten puukauppayhtiönsä Pohjalaisten Puu Oy:n kautta. Puuta välittävät, ilman omaa jalostusteollisuutta toimivat puukauppaosapuolet ovat puukaupassa sekä myyjiä että ostajia. Tavalliselle metsänomistajalle esimerkiksi Metsänhoitoyhdistys Österbottenin puukauppayhtiö on puun ostaja, kun puolestaan teollisuudelle kyseinen yhtiö on puun myyjä. Puunvälitystoiminta perustuu siihen, että yksittäiseen metsänomistajaan verrattuna puunvälitysorganisaatio saa hankittua oman asiakaskuntansa kautta suurempia puueriä, jotka pyritään toimittamaan korkeampaan yksikköhintaan eteenpäin. Toisaalta yksittäisen puunhankintaorganisaation on ongelmallista hankkia kaikkia tarvitsemiaan puutavaralajeja, joten teollisuuslaitosten on järkevää hajauttaa puunhankintaansa ulkopuolisille toimijoille (Uusitalo 2004). Ulkopuoliset nk. vierastoimittajat kykenevät myös hankkimaan puuta sellaisilta metsänomistajilta, jotka voisivat muuten jäädä yksittäiseltä

ostajalta tavoittamatta. Metsänhoitoyhdistysten tapauksissa puunvälitystoiminta tarjoaa yksityisille metsänomistajille tiettyyn teollisuuden toimijaan sitoutumattoman puukauppakumppanin, joka pyrkii lisäämään puun menekkiä.

Yleisin puukauppatapa on pystykauppa, jossa puun ostaja vastaa puunkorjuusta ja kuljetuksesta (Luonnonvarakeskus 2023b). Muita vaihtoehtoja yksityismetsänomistajalle ovat hankintakauppa ja käteiskauppa. Niissä puun myyjä korjaa puutavaran itse ja toimittaa sovittuun paikkaan ostajan kaukokuljetusta varten. Käteiskauppa tarkoittaa jo valmiiksi ilman etukäteissopimusta tyypillisesti tienvarteen toimitetun erän kauppaa, mutta on ongelmallisuutensa takia harvinainen kauppatapa (Kontinen ym. 2019). Toimituskauppa tarkoittaa hankintakauppaa, jossa puutavara toimitetaan ostajan käyttöpaikalle asti. Tätä kauppatapaa käyttävät erityisesti Metsähallitus Metsätalous Oy ja osa metsänhoitoyhdistyksistä. Toimituskauppa edellyttää luonnollisesti, että myyjä kykenee järjestämään puun korjuun ja kuljetuksen itse.

Edellisestä seuraa, että pystykaupassa on myyjällä ja ostajalla sovittavia asioita enemmän. Kontisen ym. (2019) mukaan määriteltävä on ainakin leimikon eli hakkuukohteen sijainti, sopimuksen voimassaoloaika, hakkuun mahdollinen ajankohta, arvio puutavaralajien määristä ja yksikköhinnat sekä puutavaralajien mitta- ja laatuvaatimukset. Myös maksuehdot ja maksujen perusteena olevan mittauksen suorittamistapa on sovittava myyjän ja ostajan välillä. Hankintakaupassa olennaista ovat lähinnä puutavaralajien arvioidut määrät, laatu ja mitat sekä yksikköhinta. Lisäksi on sovittava luovutusaika ja sellainen paikka, josta puutavara-auto voi turvallisesti noutaa erän.

Puunhankintaorganisaatioissa on korjuu- ja kuljetusyrittäjien lisäksi toimihenkilöitä, jotka vastaavat puukaupasta ja siihen liittyvistä sopimuksista ja urakoitsijoiden työnjohdosta. Tyypillinen työnimike on metsäasiantuntija, sillä myös metsäyhtiöissä toimihenkilöiden tehtäviin kuuluu puun oston lisäksi metsänomistajien neuvontaa ja metsänhoitopalveluiden markkinoimista. Metsänhoitoyhdistyksissä toimihenkilöiden tehtävämäärä on laajempi, eikä puun ostaminen ole useinkaan toimihenkilön pääasiallinen työtehtävä. Yhdistysten tehtäviä puukaupassa ovat puunvälitys- eli korjuupalvelun lisäksi puukauppojen kilpailuttaminen sekä metsänomistajien edunvalvonta ja neuvonta.

Puun ostoa harjoittava toimihenkilö vastaa tyypillisesti edustamansa organisaation toiminnasta tietyllä maantieteellisellä alueella. Ostohenkilöt kartoittavat sopivia puunkorjuukohteita eli leimikoita, käyvät maastossa ja tapaavat metsänomistajia. Puun ostaminen on siis melko käytännönläheistä, vaikkakin huomioitavia asioita on paljon. Lakien ja sertifikaattien lisäksi metsänomistajien preferenssit vaikuttavat asioiden etenemiseen vahvasti. Suomen muusta maailmasta poikkeava metsänomistusrakenne on luonut nykyisenlaisen henkilön ja yhtiön välisen puukaupankäynnin pohjan, koska suuri osa metsistä on yksityisomisteisia (Karppinen ym. 2020). Esimerkiksi Ruotsissa, jossa metsäyhtiöt itse omistavat suuren osan yksityismetsistä, ei vastaavaa puun ostoa tarvitse toteuttaa ja suunnitella samoissa määrin kuin Suomessa. Toisen ääripään muodostaa plantaasimetsätalous, jossa kaikki puu hankitaan tehtaan viereisiltä plantaaseilta eli metsäyhtiö kasvattaa tarvitsemansa puuraaka-aineen alusta loppuun itse omilla tai vuokraamallaan mailla (Evans & Turnbull 2004).

Käytännön puukaupan valmistelu ja kaupan kohteena olevan puuston etukäteismäärittely on mullistunut luvussa 2 esiteltyjen kaukokartoitussovellutusten myötä. Laserkeilauspohjainen latvuspintamalli ja ilmakuvat antavat hyvän perustan maastotyölle, ja puuston mitausta ei perinteisin välinein tehdä välttämättä lainkaan, vaan käytetään esimerkiksi Trestima-puhelinsovellusta kaukokartoitusaineistojen lisäksi (Kärhä ym. 2019). Puustotietojen mittaus on muuttunut avoimenkin metsävaratietoaineiston osalta maastotarkastukseksi, ja kuvioittaista arviointia tehdään vähän ja hyvin silmänvaraisesti kaupan kohteena olevan leimikon puutavaralajien määrän arvioimiseksi. Vaikka maastotyötä edelleen tarvitaan, on tietynlaista puutavaralajia sisältävien metsiköiden seulonta metsävaratiedosta yksinkertaista ja siten työn painottaminen tietyille alueille helppoa. Esimerkiksi tukkipuuta sisältävät järeät puustot erottuvat latvuspintamallista selkeästi ja nopeasti, ja avoimenkin metsävaratiedon laatutunnusten mukaisesti puustotiedon tarkkuus on siellä hyvä (Metsäkeskus 2022a). Vastaavasti metsänhoitokohteiden seulonta onnistuu myös helposti, vaikka niiden puustotietoihin ei voidakaan pelkästään kaukokartoituksen pohjalta luottaa. Nykyhetken avoin metsävaratieto auttaa siis suuntaamaan metsätoimihenkilön työtä, mutta maastokäynti on lähes aina pakollinen esimerkiksi tiestön kunnan määrittämisen lisäksi myös puustotietojen tarkastamisen takia

### 3.2 Puunkorjuu ja lähikuljetus

Teollisuuden puuraaka-aine korjataan Suomessa täysin koneellisesti (Strandström 2022). Osa hankintakauppojen puutavarasta voi olla manuaalisesti moottorisahalla valmistettua, mutta sellaisenkin puutavaran lähikuljetus, eli metsäpalstalta tienvarsivarastolle kuljettaminen, tapahtuu joko metsäkuljetukseen tarkoitettulla kuormatraktorilla tai maatalous- traktorin metsäkärriellä. Suomessa ja muualla Pohjoismaissa on käytössä tavaralajimene- telmä, eli puutavara valmistetaan jo metsässä teollisuuden käyttökohteiden asettamien mitta- ja laatuvaatimusten mukaisiksi puutavaralajeiksi (Uusitalo & Kivinen 2023). Muu- alla maailmassa kokopuukorjuu on yleistä, eli puut karsitaan ja katkotaan vasta joko tien- varsivarastolla tai käyttöpaikalla.

Puunkorjuun ja lähikuljetuksen hoitavat metsäkoneyrittäjät, joilla on korjuusta sopimus urakanantajan kanssa (Kivinen 2022). Puunkorjuuyrittäjiä urakoi tyypillisesti metsäyhti- öille, mutta myös metsänhoitoyhdistyksille ja suoraan suuremmille metsänomistajille, kuten metsärahastoille tai Metsähallitukselle. Tavallisilla perhemetsänomistajilla voi myös olla korjuukalustoa, jolla työskennellään omissa tai lähialueen metsänomistajien metsissä. Hankintakaupalla myytävä puutavara onkin usein korjattu tällaisella kalustolla. Puutavaralajimenetelmän korjuuketjuun kuuluu hakkuukone ja kuormatraktori (Uusitalo & Kivinen 2023).

Metsänomistajia palvellakseen puun ostajat hankkivat melko vaihtelevia leimikoita, joten Suomen tyypillisen korjuukalusto on ns. yleismallista eli painoltaan noin 20 tonnia. Se tarkoittaa, että samalla ketjulla kyetään tekemään sekä pääte- että harvennushakkuita. Pel- kästään harvennushakkuuseen tai järeisiin päätehakkuisiin erikoistunutta ja kalustoa on ammattimaisessa urakoinnissa käytössä Suomessa vähän. Esimerkiksi Ruotsissa harven- nuksia ja päätehakkuita tekevät usein eri koneketjut, ja kalusto on erikoistuneempaa. Ero johtuu mm. metsänomistusrakenteesta, suuret metsäyhtiöiden omat maat tarjoavat kor- juuyrittäjille mahdollisuuden erikoistua (Skogsforum 2022, Skogstyrelsen 2022). Tässä tutkimuksessa keskitytään pelkästään harvennushakkuisiin, ja siten myös aineiston tuot- taneet koneketjut on lähes täysin harvennushakkuisiin erikoistunutta pientä, reilusti alle 15 tonnista kalustoa.



**Kuva 2. Metsänhoitoyhdistys Österbottenin sopimusurakoitsijan pienikokoisista koneista koostuva korjuuketju ensiharvennuksella Närpiössä (Kokkonen 2023)**

### **3.3 Puutavaran kaukokuljetus ja tehdasvastaanotto**

Metsässä sijaitsevalta tienvarasivarastolta puutavara kuljetetaan puutavara-autolla joko suoraan käyttöpaikalle, terminaaliin ja toiseen kuljetusvälineeseen. Kaukokuljetusmuotoja ovat autokuljetuksen lisäksi rautatiekuljetus ja uitto, eli vesitiekuljetus. Viime vuosikymmenet autokuljetuksen osuus on ollut suuri, noin 75 % (Strandström 2022). Rautateillä puuta liikkui samaisen tilastaselvityksen mukaan noin 20 % ja alle 5 % uitettiin vesistöjä pitkin. Eri kuljetusmuotojen osuudet ovat olleet melko vakiot, johtuen tehtaiden ja tieverkon vakiintumisesta ja suuren mittakaavan uiton loppumisesta 1990-luvun alkuun mennessä. Strandströmin (2022) mukaan autokuljetuksen keskilähtömatka on noin 100 km, vesiteitse 300 km ja rautateillä jopa 350 km. Rauta- ja vesitiekuljetukseen sisältyy aina jonkin verran autokuljetusta, sillä tienvarasivarasto on aina noudettava ensin puutavara-autolla riippumatta seuraavasta kuljetusvälineestä.

Käyttöpaikalla puutavara otetaan vastaan ja mitataan sekä laadullisesti että määrällisesti. Tehdasvastaanottoa ja puun käsittelyä ylläpitää toisinaan käyttöpaikan ulkopuolinen organisaatio. Tehdasvastaanoton tehtävä on määrittää käyttöpaikalle tulevan puutavaran

määrä ja sovittujen mitta- ja laatuvaatimusten täytyminen (Uusitalo 2004). Puunkorjuun tapaan puutavaran kaukokuljetus on siihen erikoistuneiden yrittäjien vastuulla, ja tehdasvastaanotossa määritetään kuljetuksen maksuperusteet punnitsemalla puutavara-auto ennen ja jälkeen kuorman purkamisen. Kuitu- ja energiapuun määrä- ja laatumittaus perustuu otantaan ja muuntolukuihin, joskin tehdasmittaus on silti tarkemmin säädeltyä kuin muut puutavaran mittaustavat (Laki puutavaran mittauksesta 2013). Tukit mitataan määrän ja alustavan laadun selvittämiseksi yksittäin heti sahan tukkilajittelun alussa laservaloon perustuvalla mittauksella (Melkas 2018a). Maksun perusteena olevan puutavaran määrän lisäksi korjuu- ja kuljetusyrittäjät saavat tiedoksi raportin toimittamansa puutavaran mitta- ja laatuvaatimusten täytymisestä.

### **3.4 Puunkorjuun tuottavuus- ja kustannustekijät**

Puunhankinnan kokonaiskustannuksia selvitettäessä on tunnettava eri puunhankinnan osa-alueiden ja niiden operaatioiden kustannustekijät. Kustannukset syntyvät korjuu-, kuljetus- ja yleiskustannuksesta sekä kantohinnasta (Uusitalo 2004). Yleiskustannukseen kuuluvat mm. toimihenkilöiden palkat, työtilat ja työvälineet (Strandström 2022). Kauko- ja lähikuljetuksen kustannus muodostuu lähes täysin kuljetusetäisyyden perusteella. Tämän tutkimuksen kannalta olennaista on korjuukustannus eli hakkuun ja lähikuljetuksen kustannus, siitähän puutavaran valmistuksen eli hakkuutyön osuus.

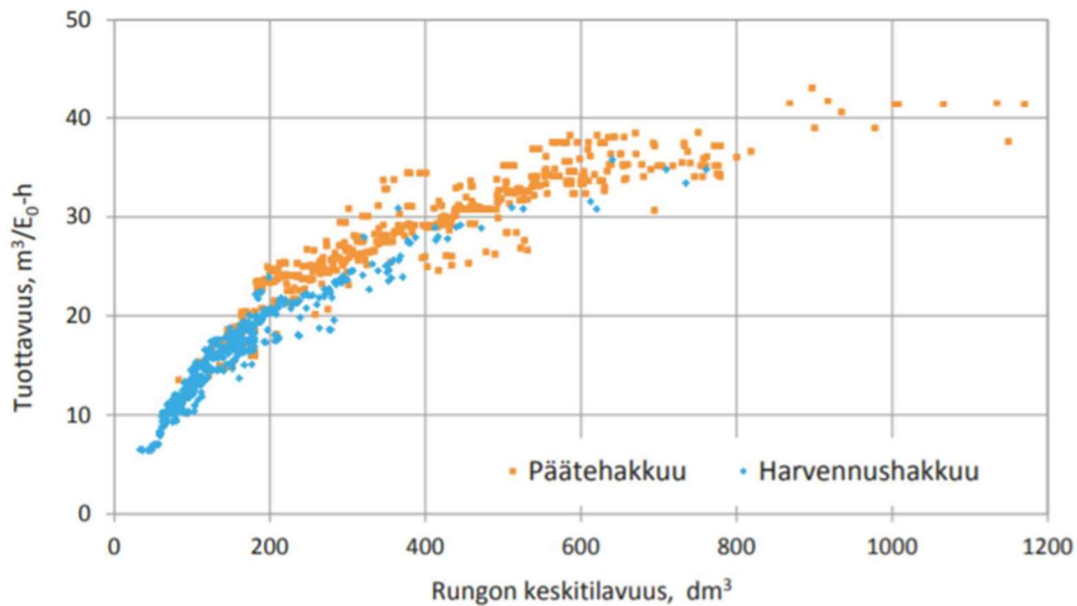
Puunhankinnan kustannusten avulla voidaan laskea, mitä puutavaran toimittaminen käyttöpaikalle vähintään maksaa. Varsinaisen tehdashinnan määrittäminen vaatii kuitenkin tietoa puunjalostusprosessin ja lopputuotelogistiikan kustannuksista sekä lopputuotteen myyntihinnasta. Usein on totuttu laskemaan siten, että metsänomistajan kantohinnaksi jää se, mitä puunjalostusyrityksen katteen ja pakollisten puunhankintakustannusten jälkeen jää jäljelle. Yllä kuvatusta laskennasta muodostuu kunkin toimijan puustamaksukyky eli WPC (= Wood Paying Capacity) (Jylhä ym. 2019).

#### ***3.4.1 Hakkuun ja lähikuljetuksen tuottavuus ja kustannukset***

Tuottavuus tarkoittaa työn tulosta suhteessa siihen käytettyihin panoksiin. Hakkuutyön tapauksessa tuotosta ovat hakatut kiintokuutiot ja panosta niiden valmistamiseen käytetty

aika. Metsäkuljetuksessa vastaavasti tienvarteen saatu kuutiomäärä on työn tuotosta. Metsäkoneella, sekä hakkuukoneella että kuormatraktorilla on tietty tuntikustannus, joka muodostuu hankinnan pääomakustannuksista ja juoksevista kuluista kuten varaosista, polttoaineesta ja kuljettajien palkoista. Kustannusten perusteella on mahdollista laskea, kuinka paljon koneen käyttötunti vähintään maksaa.

Kuiton ym. (1994) tutkimuksen mukaan hakkuutyön tuottavuuteen ja sitä kautta kustannuksiin vaikuttaa olennaisesti poistettavan puuston rungon koko eli keskijäreys (litraa/runko), vastaavasti metsäkuljetuksen tuottavuutta selittää vahvimmin metsäkuljetusmatka. Hakkuutavalla (päätehakkuu, harvennus) on myös suuri vaikutus. Päätehakkuun suurempaa tuottavuutta selittää osittain isompi rungon koko, mutta myös se, että aikaa ei kulu jäljelle jäävien puiden varomiseen (Jylhä ym. 2019). Tämän takia myös puunkorjuutyön hinnoittelu perustuu pääosin näihin tekijöihin. Kuljettajan osaamisella on havaittu olevan rungon koon jälkeen suurin vaikutus työn tuottavuuteen (Väättäinen ym. 2005). Myös olosuhteet (esim. kivisyys, märkyys tai lumen paksuus), metsäkoneen ominaisuudet ja puunhankintaorganisaation toiminta vaikuttavat hakkuun ja metsäkuljetuksen tuottavuuteen, mutta niiden vaikutuksen mittaaminen on hankalaa (Siren & Aaltio 2003). Puulajilla on havaittu olevan vaikutusta hakkuun tuottavuuteen ja vastaavasti katkotun puutavaralajin pituudella metsäkuljetukseen, mutta harvennuskohteiden keskijäreyksillä eroa ei ole merkittävästi (Kuitto ym. 1994). Esimerkiksi männyn ja koivun suuret oksat alkavat hidastaa hakkuuta pienemmillä rungon järeyksillä kuin kuusella, jossa oksia on enemmän, mutta niiden keskiläpimitta pienempi. Harvennushakkuussa rungot ovat kuitenkin yleensä sen verran pieniä, että puulajin kasvutavasta johtuvat erot eivät korostu, vaan keskijäreys selittää tuottavuutta lähes täysin hakkuukohteen ominaisuuksista.

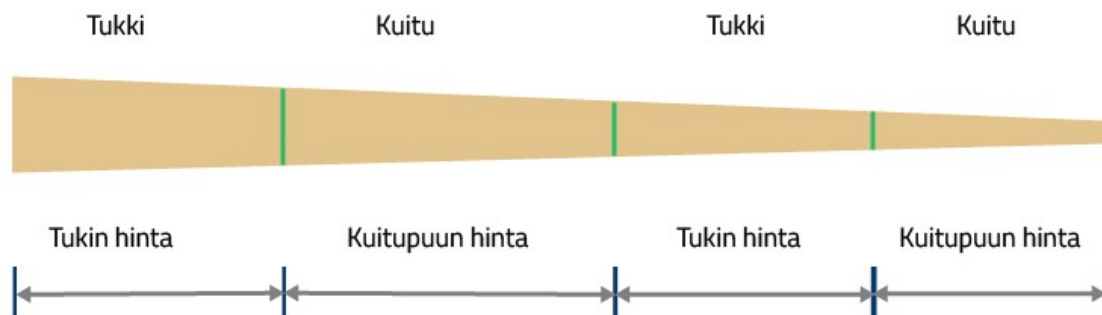


Kuva 3. Hakkuun tehotuntuotos harvennus- ja päätehakkuulla (Jylhä ym. 2019).

### 3.5 Puun hinnoittelumenetelmät ja puutavaralajit

Suomessa puutavaran kaksi pääasiallista hinnoittelutapaa tällä hetkellä ovat puutavaralajihinnoittelu ja runkohinnoittelu (Malinen ym. 2015, Luonnonvarakeskus 2020). Runkohinnoittelu tarkoittaa sitä, että puutavaralle määritetään yksi hinta per tilavuusyksikkö. Hinta muodostetaan tyypillisesti puulajikohtaisesti, esimerkiksi yksi kuutiohinta männylle, kuuselle ja koivulle. Suurin ero tavaralajihinnoitteluun on se, että puutavaran katkonta eri puutavaralajeihin ei vaikuta puista maksettavaan hintaan.

#### Tavaralajihinnoittelu



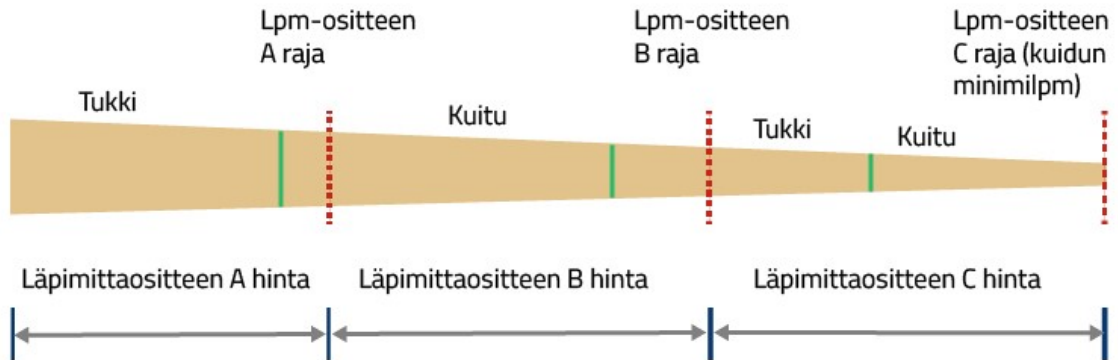
Kuva 4. Puutavaralajihinnoittelu havainnollistettuna (Ovaskainen 2022).

Puutavaralajihinnoittelussa jokaiselle leimikosta ostettavalle puutavaralajille on määritetty hinta. Tyypillisesti puutavaralajeja ovat tukit (sahatukki ja sorvitukki) kuitu- ja energiapuu sekä pikkutukit (Uusitalo & Kivinen 2023). Puutavaralajien mitta- ja laatuvaatimukset vaihtelevat ostajittain, mutta ovat pääpiirteittäin samankaltaisia.

**Taulukko 1. Yleisimmät puutavaralajit mittoineen (Ovaskainen 2022).**

Puutavaralaji	Käyttötarkoitus	Pituus	Minimiläpimitta
tukki	sahaus ja vanerin tuotanto	31–67 dm yleensä 3 dm moduleissa (jalkamitat)	15–20 cm
pikkutukki	sahaus	31–43 dm	10–15 cm
parru	sahaus	31–67 dm	12–18 cm
pylväs	pylväät	700–1500 cm	17 cm -
kuitupuu	massan valmistus	270–320 cm	6–8 cm
kuitupuu, vapaakattokottu	massan valmistus	270–550 cm	6–8 cm
energiapuuranka (karsittu ranka tai kokopuu)	energiantuotanto	min n. 250 cm	4 cm (karsittu ranka)
latvusmassa	energiantuotanto	-	-
kannot	energiantuotanto	-	-
metsähake	energiantuotanto	-	-

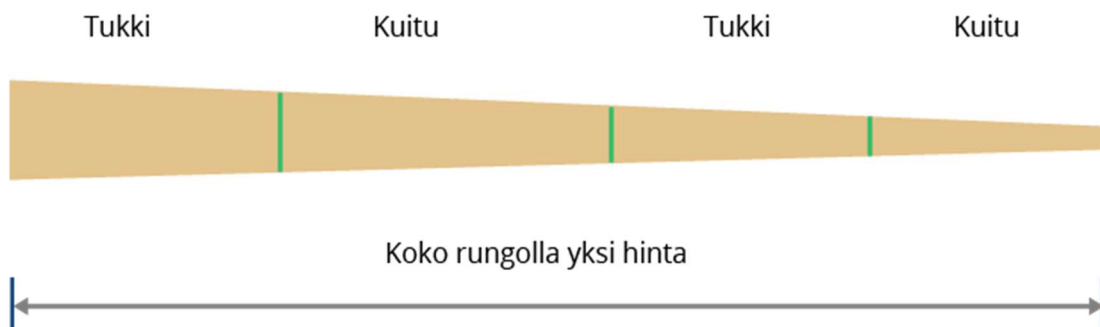
## Rungonosahinnoittelu



Kuva 5. Rungonosahinnoittelu havainnollistettuna (Ovaskainen 2022)

Puutavara- ja runkohinnoittelumenetelmän lisäksi on olemassa myös rungonosahinnoittelu, jossa tukin hinta maksetaan tiettyyn läpimittaan asti laadusta riippumatta loppuosan rungosta saadessa kuitupuun hinnan (Malinen & Kilpeläinen 2013, Kivinen 2022). Menetelmää ei kuitenkaan käytetä Suomessa.

## Runkohinnoittelu



Kuva 6. Runkohinnoittelu havainnollistettuna (Ovaskainen 2022).

Viime vuosina runkohinnoittelun osuus on kasvanut (Maaseudun Tulevaisuus 2021). Kaikilla suuremmilla ostajilla runkohintakauppojen osuus on ollut artikkelin mukaan noussussa. Puutavaralajien hintoihin vaikuttaa yllä kuvattu puustamaksukykyasetelma, josta runkohintakin muodostuu. Runkohinta on arvio eri hintaisten puutavaralajien suhteista leimikolla, joten ennakkotiedon tarkkuus on olennaisen tärkeää. Malinen & Kilpeläinen (2013) toteavat, että runkohinnoittelussa mm. ennakkoarvioriskin takia puulle on taipumus muodostua todellista jalostusarvoa korkeampi hinta. Korjuukustannusten ja eri hintaisten puutavaralajien suhteiden arvioimisesta aiheutuvaa riskiä voi kuitenkin pienentää käyttämällä nk. hinnoitteluportaita, joita esim. Metsä Group käyttää järeysrunkohinnoittelussaan (Metsä Group 2023). Järeysrunkohinnoittelu toimii muuten runkohinnoittelun tapaan, mutta toteutunut poistuman keskijäreys vaikuttaa portaittain puulajikohtaiseen runkohintaan. Poistuman keskijäreiden noustessa runkohinta nousee ja päinvastoin. Porastetun hinnan lisäksi toinen tapa alentaa pystyvuoston arvioinnista johtuvaa virhettä on sekoittaa hinnoittelumenetelmiä keskenään. Osa katkottavista puutavaralajeista voidaan hinnoitella erikseen runkohinnan ulkopuolelle. Tämä tapa tulee kysymykseen esimerkiksi lahovikaisen kuusen tapauksessa tai muiden puulajien kuin männyn ja kuusen hinnoittelussa. Hintaportaat korjaavat järeiden ennustevirhettä, useamman hinnoittelumenetelmän käyttö puolestaan puutavaralajijakauman.

Puukaupan arvo voitaisiin sopia myös kiinteällä rahamääräisellä hinnalla, mutta eri hinnoittelumenetelmien tarkoitus on pyrkiä ennustamaan kauppahintaa tarkemmin samalla markkinatilanne huomioiden. Hinnoittelumenetelmät keskiarvoistavat kuitenkin kunkin leimikon todellista jalostusarvoa suuntaan tai toiseen, koska pystyvuoston täydellinen ennakkomäärittely on mahdotonta (Malinen & Kilpeläinen 2013).

## 4. AINEISTO JA MENETELMÄT

Tutkimus toteutettiin käyttäen kahta aineistoa, Metsäkeskuksen metsävarakuvioita sisältävää GeoPackage-tiedostoa ja Svfn sopimusurakoitsijoiden hakkuukoneiden korjuulohkokohtaisia mittaustietoja. Kokonaisuudessaan aineisto koostui 114 Svfn hakkaamasta korjuulohkosta ja korjuulohkoja vastaavista metsävarakuvioista. Seuraavissa kappaleissa esitellään aineistot, selvitetään otannan valinta ja käydään läpi tutkimusmenetelmä.

### 4.1 Käytetyt aineistot

Työn referenssiaineistona toimivat Svfn sopimusurakoitsijoiden korjaamat leimikot tai oikeammin korjuulohkot, joista tunnettiin hakkuukoneen mittaustiedot, sijainti kartalla, pinta-ala, ym. tietoa. Mittaustiedot perustuvat hakkuukoneen mittalaitteeseen, joka määrittää valmistettavan puutavaran tilavuuden rungon prosessoinnin yhteydessä. Mittalaite mittaa sekä rungon paksuutta että pituutta mekaanisesti karsimateriaalien tai syöttörullien sekä pituusmittapyörän avulla (Melkas 2018b). Lämpimitan jatkuvasta mittauksesta suodatetaan 1–10 cm pätkiä, joiden tilavuus lasketaan lieriön tai katkaistun kartion kaavalla pois lukien rungon tyviosia, jolle on omat funktionsa (Melkas 2018b). Menetelmän tarkkuuden on oltava  $\pm 4\%$  (Laki puutavaran mittauksesta 2013). Tilavuuden laskentaa rungon osista kutsutaan kuutioinniksi, ja summaamalla rungon pätkiä ja runkoja yhteen voidaan koko leimikon tilavuus määrittää puukauppa- ja urakointimaksuja varten. Kuljettaja määrittää jokaiselle katkotulle pölkylle puutavaralajin käytössä olevan katkonnanohjaustiedoston ja rungon laadun mukaisesti. Näin saadaan laskettua katkottujen puutavaralajien määrät. Tuotostiedot ja niiden käsittely ja siirtäminen perustuvat StanForD-2010-metsäkoneiden tiedonvälitysstandardiin, jolla mahdollistetaan tiedonsiirto hakkuukoneelle ja koneelta edelleen toiminnanohjausjärjestelmiin (Räsänen ym. 2019). Järjestelmät lukevat standardissa määritellyjä xml-pohjaisia tiedostoja, joista tuotostiedot saadaan näkyville ymmärrettävässä muodossa. Tiedonsiirto toimii moneen suuntaan, urakanantaja lähettää standardin mukaisissa tiedostoissa leimikon perustiedot ja katkonnanohjaustiedot hakkuukoneelle ja myös koneurakoitsija voi seurata kuljettajiensa töiden edistymistä. Tässä työssä olennaisia hakkuukoneen mittaamia tietoja olivat katkottujen puutavaralajien määrät ja runkojen keskijäreys.

Yhdistys käyttää puunkorjuupalvelussaan WoodForce-ohjelmistoa, josta korjuulohkotiedot tulevat yhdistyksen yleiseen toiminnanohjausjärjestelmään SilvaPro:hon (4/2023 asti). Sieltä leimikon tiedot voidaan lukea, mutta myös ajaa suoraan Excel-taulukkolaskenta-ohjelmaan.

Avoimen metsävaratiedon aineisto oli Suomen Metsäkeskukselta saatu GeoPackage-tiedosto, joka sisälsi metsävarakuvioidan Pohjanmaan maakunnan alueelta sellaisena, kuin se oli 1.1.2020. Metsävarakuvioaineisto käsitteenä ja sen sisältämä tieto on kuvattu luvussa 2.

Metsävaratiedon päivitys asetti aineiston otannalle tietyt rajoitteet. Metsänkäyttöilmoitus on voimassa kolme (3) vuotta, joten metsävarakuvioiden puustotietojen oli syytä olla vanhempia kuin sen vuoden, jonka hakkuita tarkastellaan. Metsänkäyttöilmoituksen lähettäminen aiheuttaa puustotiedoissa metsänhoidon suositusten mukaisen laskennallisen hakkuun, joten puustotietoon ennen hakkuuta ei päästä käsiksi, jos käytössä on metsänkäyttöilmoituksen jättämisen jälkeen saatu tieto (Metsäkeskus 2022b). Metsäkeskuksen (2021) mukaan kuviotiedot päivittyvät kahdesti viikossa ilmoitusten perusteella. Tämän vuoksi käytössä olivat vuoden 2020 metsävarakuviot, joten mikään sen jälkeen lähetetty metsänkäyttöilmoitus ei vaikuta kuviotietoihin. Hakkuiden tarkasteluvuodeksi valittiin 2022, koska oli todennäköistä, että suuri osa sen vuoden hakkuista on ilmoitettu Metsäkeskukseen 1.1.2020 jälkeen.

#### **4.2 Aineiston hankinta ja kelvollisten havaintoyksiköiden otanta**

Aineiston hankkiminen alkoi korjuulohkolistan rajaamisella Svf:n SilvaPro-toiminnanohjausjärjestelmässä. Järjestelmästä haettiin vuonna 2022 korjatut lohkot, joiden hakkuutapa oli harvennus tai ensiharvennus. Näin voitiin varmistua, että hakutuloksena saadaan koko yhdistyksen alueelta vain harvennuslohkoja, eivätkä esimerkiksi uudistushakkuut tai hankintakaupat tule mukaan jo muutenkin suureen suodatettavien tietorivien määrään ja mahdollisesti vääristämään tuloksia.

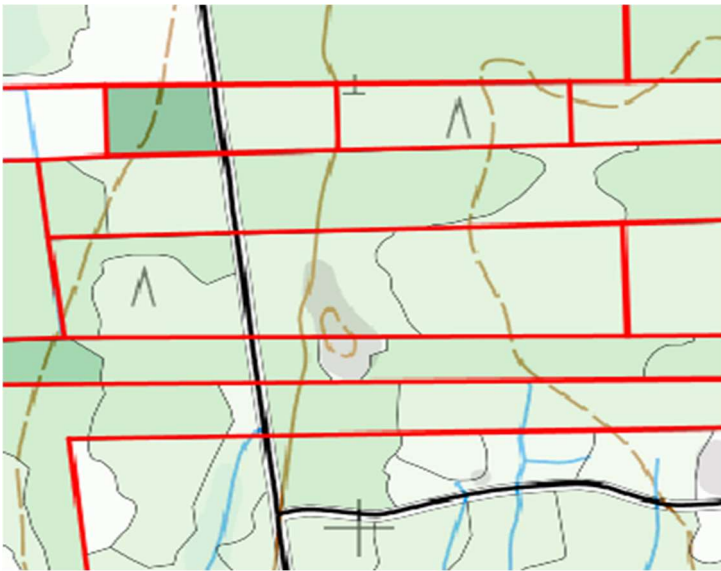
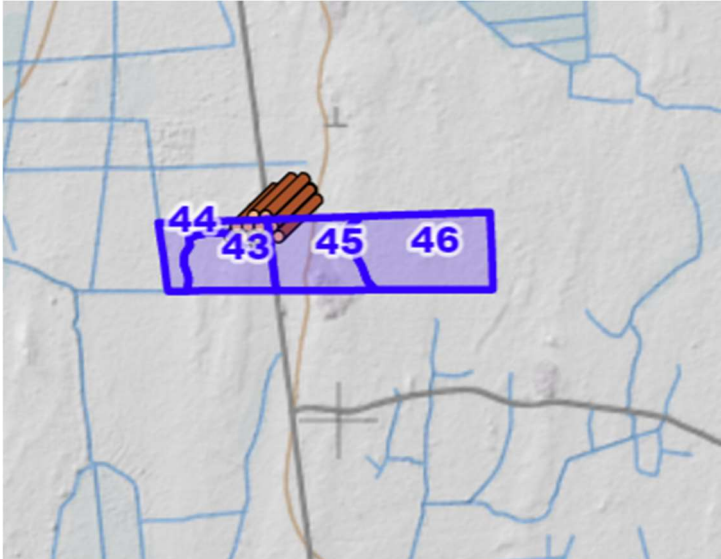
Aineistonhallinnan ja -käsittelyn esivalmisteluihin kuului olennaisesti myös Metsäkeskuksen metsävarakuvioaineiston käyttöönotto. Tietokantarakenteesta haettiin käyttöön metsävarakuvioiden puusto-ositteet männylle, kuuselle ja lehtipuulle ja näiden summat

eli summapuusto sekä kuviogeometriat. Metsävarakuvioaineiston lisäksi tarvittiin pohjalle Maanmittauslaitoksen maastokartta sekä metsänkäyttöilmoitukset omana karttatasonaan. Metsänkäyttöilmoitukset ja maastokartta saatiin WMS/WMTS-rajapintana Maanmittauslaitoksen ja Metsäkeskuksen aineistopalveluista.

Otantaan valittujen havaintoyksiköiden tuli täyttää seuraavat vaatimukset:

1. Kuvioiden geometriat ovat samanlaiset sekä metsävarakuvioaineistossa että todellisuudessa.
2. Hakkuutapa on vain harvennus tai ensiharvennus.
3. Metsänkäyttöilmoitus on tehty 1.1.2020 jälkeen.
4. Hakkuukoneen mittaus- ja tuotostiedot ovat tallentuneet oikein SilvaPro-järjestelmään ja ne ovat sieltä luettavissa.
5. Korjuulohkon kuvioille löytyy metsävarakuvioaineistosta mielekkäät kuviotiedot, puutteellisia tai korruptoituneita tietoja ei hyväksytä.

Otannan valikoiminen tapahtui siten, että SilvaPro-järjestelmässä olevaa korjuulohkolistaa lähdettiin käymään systemaattisesti läpi korjuulohko kerrallaan. Jokaisen korjuulohkon kohdalla tarkastettiin yllä mainittujen ehtojen täytyminen. Suurin epävarmuus yllä olevien ehtojen täyttymisessä oli geometrioiden yhteensopivuuden tarkastaminen. Geometrian täsmävyys tarkastettiin visuaalisesti Qgis:n maastokartan ja SilvaPro:n työmaakarttoja vertailemalla. Epäselvissä tilanteissa verrattiin myös metsävarakuvion ja SilvaPro:n työmaakartan kuvioiden pinta-alaa. Mikäli geometrioiden vertailukelpoisuus oli pienimmässäkään määrin epäselvä, hylättiin havaintoyksikkö (=korjuulohko) otannasta. Käyttöön saatu aineisto oli niin laaja, että varmasti kelvollisten havaintoyksiköiden löytäminen oli erittäin todennäköistä ilman epäselvien tapausten mukaan ottamista. Metsänkäyttöilmoituksen geometriaa pystyi myös käyttämään yhtenä korjuulohkon kuvioiden geometrian tarkastamisvälineenä. Metsänkäyttöilmoitus-karttatasoa tarvittiin kuitenkin pääsääntöisesti ilmoituksen jättöpäivämäärän tarkastamiseen. Hakkuukonetiedot ja hakkuutavat tarkastettiin SilvaPro:sta, korjuulohkon tiedoista, ja lopuksi tarkastettiin metsävarakuvioaineiston sisältämän puustotiedon mielekkyys. Puutteellisia tai selkeästi virheelliseltä vaikuttaneita puustotietoja sisältäneitä kuvioita ei otettu osaksi otantaa.



**Kuvat 7 ja 8. Neljästä kuviosta koostuva korjuulohko sekä SilvaPro-järjestelmän työmaakartalla että metsävarakuviotietoaineistossa Qgis-ohjelmistossa kuvattuna.**

Sopivan korjuulohkon, joka täytti sekä hakkuukoneen mittaustietojen että metsävarakuvioaineiston osalta kaikki ehdot, löydyttyä, täytettiin Excel-taulukkoon uusille sarakkeille metsävarakuvioaineistosta korjuulohkoa ennen hakkuuta vastaavat summapuustotiedot. Korjuulohkot koostuivat usein useammasta kuviosta, joten puustotiedot keskiarvoistettiin pinta-alan mukaan painotettuna koko korjuulohkon aluetta vastaaviksi. Tätä varten rakennettiin Excel-pohjainen laskin, josta keskitunnukset voitiin lukea jokaisen otantaan valikoituneen korjuulohkorivin sarakkeille. Luettuja tunnuksia olivat alaryhmä (kivennäismaa/turvemaa), kasvupaikka, pinta-ala (ha), pohjapinta-ala (m<sup>2</sup>/ha), runkoluku (r/ha), keskiläpimitta (cm), keskipituus (m), tukkitilavuus (m<sup>3</sup>/ha), kokonaistilavuus (m<sup>3</sup>/ha)

sekä näistä lasketut avoimen metsävaratiedon mukaiset keskijäreys (l/runko) ja tukkiprosentti. Keskijäreys saatiin jakamalla kokonaistilavuus runkoluvulla ja tukkiprosentti tukkitilavuus kokonaistilavuudella. Kokonaistilavuus saatiin yhteenlaskettuna kuitupuun- ja tukkitilavuutena, eikä metsävarakuvioaineistossa erikseen esitettyä latvahukan tilavuutta otettu huomioon. Kasvupaikka ja alaryhmä määräytyivät korjuulohkolle sen mukaan, mitä tyyppiä kuvioiden pinta-alan perusteella oli eniten korjuulohkolla. Avoimen metsävaratiedon puustotietojen syöttämisen jälkeen etsittiin SilvaPro-järjestelmästä korjuulohkon mittaustiedoista lohko-kohtainen poistuneen puuston keskijäreys (l/runko). Toteutunut tukkiprosentti laskettiin jakamalla katkottujen puutavaralajien määrästä tukkipuutavaralajien osuus kokonaistilavuudesta.

Korjattuja lohkoja pelkästään valittuna vuonna 2022 oli monikertainen määrä siihen nähden, mitä maisterintutkielman laajuudessa olisi ollut mahdollista käsitellä. Tämän vuoksi korjuulohkoista pyrittiin saamaan yhdistyksen alueella maantieteellisesti mahdollisimman tasainen otos, jonka analysointi tuottaisi tilastollisesti merkitseviä riippuvuussuhteita. Käytännössä otantaa tehtiin käymällä läpi korjuulohkoja mittauspäivämäärän perusteella lajiteltuna uusimmasta vanhimpaan. Kun syksyllä hakattuja 2022 korjuulohkoja alkoi olla osana aineistoa kymmeniä, tehtiin listassa siirtymä kesään kesäkorjuukelpoisten lohkojen mukaan saannin varmistamiseksi. Sama toimenpide toistettiin uudelleen alkuvuoteen 2022 talvilohkojen osalta. Syksy 2022 oli leuto, jolloin hakattiin lähinnä kesä- ja kelirikkokohteita. Alkuvuosi 2022 oli korjuuolosuhteiden puolesta erittäin otollinen, joten todellisia talvileimikoita saatiin otantaan lähinnä siltä ajanjaksolta.

Otantaa tasoitettiin satunnaisuuden periaatteita vastoin sen takia, että kyettäisiin ottamaan huomioon metsävaratiedon laserkeilausinventointiajankohtien välinen vaihtelu yhdistyksen alueella sekä löytämään vaihtelevia kohteita, jotta otanta olisi mahdollisimman edustava. Talvikohteet ovat tyypillisesti turvemaita tai kuusikoita, kun puolestaan kesäkohteet sijaitsevat karummilla mäntyvaltaisilla kivennäismailla (Kivinen 2022). Metsävaratiedon laserinventoinnista kulunut aika vaihtelee yhdistyksen alueella, vanhimmillaan Närpiön alueella inventointi on tehty ryppäittäin vuonna 2012, kun puolestaan Vaasan pohjoispuolella uusin vuoden 2020 metsävarakuvioihin päivittynyt laserkeilaus on vuodelta 2016 (Metsäkeskus, hila-aineisto, 2023). Metsävaratiedon laatuselosteessa (2022a) kasvumallin toimivuudeksi kasvatusmetsissä todetaan 5–10 vuotta. Ajantasaistus aiheuttaa myös

jonkin verran virheitä, esimerkiksi joskus metsänkäyttöilmoituksella ilmoitettu, mutta todellisuudessa tekemättä jäänyt hakkuutoimenpide pilaa metsävaratiedon laadun kyseisillä kuvioilla.

Otantaan valikoituneille korjuulohkoille etsittiin samaan tapaan puusto-ositteet summattun tunnusten etsimisen jälkeen. Puusto-ositteiden haku tehtiin siksi, että aineiston mallinnusvaiheessa saataisiin lisää selittäjiä regressiomalleihin ja voitaisiin varmistua siitä, että vahvimmat selittäjät keskijäreydelle ja tukkiosuudelle löydettäisiin. Koska tutkimusta metsävaratiedon tunnusten ja harvennuspoistuman riippuvuussuhteista ei juurikaan etukäteen löydetty, ei mitään metsävaratiedon tunnusta voitu sulkea pois ilman tilastollista mallinnusta. Metsävaratiedossa koivu ja kaikki lehtipuut ovat yhtä ositetta, joten lehtipuuston toteutunut keskijäreys laskettiin painottamalla koivun ja ”muun puulajin” keskijäreudet katkotuilla tilavuuksilla. Tuloksena saatiin korjuulohkolistaus, joka sisältää sekä summatunnukset että metsävaratiedon mukaiset puusto-ositteet ja niille haetut referenssiarvot keskijäreydelle ja tukkiosuudelle hakkuukonemittauksen perusteella.

Osa korjuulohkoista oli myös sellaisia, että niiden puusto-ositteet olivat puutteellisia, vaikka summapuusto oli yllä kuvattujen ehtojen mukaan kelvollista. Tämän tai jonkin muun edellä esitetyn vuoksi osa havaintoyksiköistä pudotettiin aineistosta pois. Hyvin puhtaissa yhden puulajin korjuulohkoissa saattoi olla myös vain yhtä ositetta metsävaratiedon mukaan, joten ositemuuttujiin jäi välttämättä enemmän tyhjiä arvoja kuin summapuustoon liittyviin puustotunnusmuuttujiin.

### 4.3 Aineiston käsittely ja mallinnus

Kaukokartoitusperustaisesta metsävaratiedosta keskijäreiden ja tukkiprosentin mallintaminen tehtiin lineaarisella regressiomallinnuksella (Linear Regression). 114 kpl havaintoyksiköitä siirrettiin Excel-tilaukosta SPSS-tilasto-ohjelmistoon, jossa tarvittavat mallinnukset kyettiin tekemään. Mallinnus suoritettiin kahdessa osassa siten, että ensin haarukoitiin ennakkotietojen ja koko käytössä olleen aineisto-otannan perusteella (114 korjuulohkoa) parhaat selittäjät tai selittäjien yhdistelmät koko aineistolle ja eri järeyksille, jonka jälkeen aineisto jaettiin kahtia opetusaineistoon ja testiaineistoon satunnaisotannalla. Opetusaineiston perusteella tehtiin lineaariset regressiomallit parhaiksi havaituilla selittäjillä, joilla laskettiin testiaineiston korjuulohkoille keskijäreys- ja tukkiprosenttien ennusteet. Lisäksi kokeiltiin, kuinka parhaaksi todetun selittäjän matemaattinen muunnos vaikuttaa tuloksiin mahdollisen epälineaarisen yhteyden löytämiseksi. Mallien hyvyttä arvioitiin ensiksi selityksasteen ja merkitsevyyden perusteella, ennusteita puolestaan ennustevirheen. Ennustearvojen referenssiarvo eli vertailukohta oli kyseisen korjuulohkon hakkuukoneella mitattu arvo. Summapuustoista ja puusto-ositteista saatiin hakkuukonemitatuille keskijäreydelle ja tukkiprosentille selittävät muuttujat taulukon 2 mukaisesti. Jokaisella yksittäisellä taulukon muuttujalla kokeiltiin selittää poistuman keskijäreyttä ja tukkiprosenttia, jotta parhaat selittäjät saatiin haarukoitua.

Taulukko 2. Regressiomallinnuksen muuttujat.

Lyhenne/mallin osa	Tunnus
<b>SilvaKeskijäreys</b>	Hakkuukoneen mittaama korjuulohkon keskijäreys (litraa/runko)
<b>Silvatukkiprosentti</b>	Hakkuukoneen katkontatiedoista laskettu tukkiprosentti (%)
<b>Ppa</b>	Summapuuston pohja-pinta-ala metsävarakuvioaineistossa (m <sup>2</sup> /ha)
<b>Runkoluku</b>	Summapuuston runkoluku (kpl/ha)
<b>Klpm</b>	Summapuuston keskiläpimitta (cm)
<b>Kpit</b>	Summapuuston keskipituus (m)
<b>Vtuk</b>	Summapuuston tukkitilavuus (m <sup>3</sup> /ha)
<b>Vkok</b>	Summapuuston kokonaistilavuus (kuitupuu+tukkipuu, m <sup>3</sup> /ha)
<b>Keskijäreys</b>	Summapuuston keskijäreys (litraa/runko)
<b>Tukki-%</b>	Summapuuston tukkiprosentti (%)
<b>PpaMä</b>	Mäntyositteen pohjapinta-ala (m <sup>2</sup> /ha)
<b>RunkolukuMä</b>	Mäntyositteen runkoluku (kpl/ha)
<b>KlpmMä</b>	Mäntyositteen keskiläpimitta (cm)
<b>KpitMä</b>	Mäntyositteen keskipituus (m)
<b>Vmät</b>	Mänytukin tilavuus (m <sup>3</sup> /ha)
<b>VkokMä</b>	Mäntyositteen kokonaistilavuus (kuitupuu+tukkipuu, m <sup>3</sup> /ha)
<b>KeskijäreysMä</b>	Mäntyositteen keskijäreys (litraa/mäntyrunko)
<b>Tukki-%Mä</b>	Männyn tukkiprosentti (%)
<b>PpaKu</b>	Kuusiositteen pohjapinta-ala (m <sup>2</sup> /ha)
<b>RunkolukuKu</b>	Kuusiositteen runkoluku (kpl/ha)
<b>KlpmKu</b>	Kuusiositteen keskiläpimitta (cm)
<b>KpitKu</b>	Kuusiositteen keskipituus (m)
<b>Vkut</b>	Kuusitukin tilavuus (m <sup>3</sup> /ha)
<b>VKokKu</b>	Kuusiositteen kokonaistilavuus (kuitupuu+tukkipuu, m <sup>3</sup> /ha)
<b>KeskijäreysKu</b>	Kuusiositteen keskijäreys (litraa/kuusirunko)
<b>Tukki-%Ku</b>	Kuusen tukkiprosentti (%)
<b>PpaLe</b>	Lehtipuuositteen pohjapinta-ala (m <sup>2</sup> /ha)
<b>RunkolukuLe</b>	Lehtipuuositteen runkoluku (kpl/ha)
<b>KlpmLe</b>	Lehtipuuositteen keskiläpimitta (cm)
<b>KpitLe</b>	Lehtipuuositteen keskipituus (m)
<b>Vlet</b>	Lehtipuutukin tilavuus (m <sup>3</sup> /ha)
<b>VkokLe</b>	Lehtipuuositteen kokonaistilavuus (kuitupuu+tukkipuu, m <sup>3</sup> /ha)
<b>KeskijäreysLe</b>	Lehtipuuositteen keskijäreys (litraa/lehtipuurunko)
<b>Tukki-%Le</b>	Lehtipuun tukkiprosentti (%)
<b>PI-osuus</b>	Lehtipuun osuus summapuuston kokonaistilavuudesta (%)

#### 4.3.1 Mallien valinta, testaus ja ennusteet

Yhden selittäjän lineaaristen mallien tulosten perusteella tehdyn muuttujahaarukoinnin jälkeen aineisto jaettiin satunnaisotannalla kahteen osaan, opetus- ja testiaineistoon. Otanta suoritettiin antamalla jokaiselle koko aineiston korjuulohkolle (114 kpl) jokin satunnaisluku, minkä jälkeen lohkot järjestettiin satunnaisluvun mukaan pienimmästä suurimpaan. Testiaineiston tavoitekooksi asetettiin noin kolmasosa koko aineiston koosta loppujen lohkojen toimiessa opetusaineistona. 37 ensimmäistä lohkoa satunnaisluvultaan pienimmästä suurimpaan muodostivat testiaineiston, ja jäljelle jääneet 77 lohkoa opetusaineiston.

Opetusaineistossa ajettiin samalla tavalla yhden selittäjän lineaariset regressiomallit, kuin aikaisemmin koko aineistoa käytettäessä. Parhaiden selittäjien lisäksi kokeiltiin myös kahden selittäjän malleja. Selittäjiksi päätettiin valita joko runkoluku tai pohjapinta-ala yhdessä parhaiden selittäjien kanssa, sillä muut puustotunnukset korreloivat liikaa keskenään aiheuttaen kollineaarisuusongelman. Mahdollinen kollineaarisuusongelma tutkittiin tilastollisella VIF-luvulla. Lisäksi oletusarvoisesti virheettömimmin mitattavissa ollut keskipituus haluttiin mallinnukseen mukaan.

Mallien kertoimia käytettiin ennustamaan testiaineistolle lohko-kohtainen keskijäreys ja tukkiprosentti. Ennusteista laskettiin keskivirhe, suhteellinen keskivirhe, keskijajonta, RMSE ja suhteellinen RMSE. Korjuulohko-kohtainen virhe laskettiin vähentämällä hakukoneella todetusta arvosta mallin ennustama arvo, ja muut tunnuksat alla esiteltyjä kaavoja käyttäen.

Ennustevirhe

$$\text{Ennustevirhe} = \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)}{n} \quad (1)$$

Suhteellinen ennustevirhe

$$\text{Virhe} - \% = 100 * \frac{\text{harha}}{\bar{y}} \quad (2)$$

Keskihajonta

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (3)$$

RMSE eli keskineliövirheen neliöjuuri

$$RMSE = \sqrt{Harha^2 + Keskihajonta^2} \quad (4)$$

RMSE-% eli suhteellinen RMSE

$$RMSE - \% = 100 * \frac{RMSE}{\bar{y}} \quad (5)$$

, jossa

$y_i$  = tunnuksen referenssiarvo (hakkuukonemittaus)

$\hat{y}_i$  = tunnuksen ennustearvo

$i$  = leimikon tunnus [1, 114]

$\bar{y}$  = tunnuksen keskiarvo (referenssi tai ennuste)

$n$  = otoskoko

$$\text{Yleinen lineaarinen regressiomalli on muotoa } Y = b_0 + \sum_i b_i x_i + \varepsilon \quad (6)$$

, jossa

$Y$  = selitettävä muuttuja

$b_0$  = vakiotermi

$b_i$  = selitettävän muuttujan regressiokerroin

$i$  = termi [0, n]

$x_i$  = selittävä muuttuja

$\varepsilon$  = selittämättä jäävä virhevaihtelu

## 5. TULOKSET

### 5.1 Aineistojen tunnusluvut

Alla olevista taulukoista 3 ja 4 huomataan, että keskijäreys ja tukkiprosentti olivat metsävaratiedossa joka tapauksessa suurempia kuin hakkuukoneella mitatussa referenssiaineistossa. Tämä johtuu siitä, että metsävaratieto sisältää koko kyseisen puuston keskitunnuksia ja poikkeaa siten harvennuksessa poistuvan puuston tunnuksista. Tukkiprosentin osalta metsävaratieto ei ota myöskään mahdollisia laatua alentavia tekijöitä huomioon, vaan luku saadaan laskennallisesti puuston pituudesta ja keskiläpimitasta (Holopainen ym. 2011). Harvennuksessa poistetaan yleensä pienempiä ja huonolaatuisempia puita kuin mitä kyseinen korjuulohko keskimäärin sisältää, mikä korostaa metsikön keskitunnusten ja harvennuspoistuman eri puustotunnusten poikkeamaa.

**Taulukko 3. Keskijäreys puusto-ositteittain metsävaratiedossa ja hakkuukoneella mitatussa harvennuspoistumassa.**

Aineisto/keskitunnus (n=114 kpl)	Keskijäreys (l/runko)
Hakkuukonemittaus (summa)	104,6
Metsävaratieto (summa)	121,8
Hakkukonemittaus (mäntyosite)	141,3
Metsävaratieto (mäntyosite)	161,9
Hakkuukonemittaus (kuusiosite)	90,5
Metsävaratieto (kuusiosite)	98,9
Hakkuukonemittaus (lehtipuu)	77,7
Metsävaratieto (lehtipuu)	78,1

**Taulukko 4. Tukkiprosentti metsävaratiedossa ja hakkuukoneella mitatussa harvennuspoistumassa.**

Aineisto/keskitunnus (n=114 kpl)	Tukkiprosentti (%)
Hakkuukonemittaus (summa)	6,7
Metsävaratieto (summa)	18,2

Opetus- ja testiaineisto erotettiin toisistaan satunnaisotannalla.

Otannan satunnaisuudesta huolimatta testiaineiston keskijäreys ja tukkiprosentti jäivät opetus- ja koko aineistoa selkeästi pienemmäksi (Taulukko 5).

**Taulukko 5. Aineiston jakautuminen opetus- ja testiaineistoon. Taulukossa aineistojen ominaisuudet.**

Aineisto/Tunnus	Lohkojen lukumäärä n (kpl)	Keskijäreys metsävaratiedossa (l/runko)	Keskijäreys, hakkuukone (referenssi) (l/runko)	Tukkiprosentti metsävaratiedossa (%)	Tukkiprosentti, hakkuukone (referenssi) (%)
Testi	37	104	91,1	14,2	4,72
Opetus	77	122	111,1	20,1	7,64

## 5.2 Mallit poistuman keskijäreiden ja tukkiprosentin ennustamiseen

Harvennuspoistuman keskijäreiden parhaaksi selittäväksi muuttujaksi osoittautui metsävaratiedon summapuuston keskiläpimitta. Paras selittäjä määriteltiin selityksasteen mukaan mallin parametrien merkitsevyys edellyttäen. Kaikki mallinnukseen valitut selittävät muuttujat sekä poistuman keskijäreidelle että tukkiprosentille olivat metsävaratiedon summatunnuksia, yksikään puusto-osite ei kyennyt selittämään poistuman keskijäreyttä tai tukkiprosenttia summatunnuksia paremmin. Kahden selittäjän mallien ongelma oli liiallinen selittäjien välinen keskinäinen korrelaatio. Ainoat keskiläpimitan ja -pituuden kanssa liiallisesti korreloimattomat metsävaratiedon summatunnukset olivat runkoluku ja pohjapinta-ala, joiden merkitsevyys jäi heikoksi.

**Taulukko 6. Parhaiden mallien parametrien arvot harvennuspoistuman keskijäreiden ennustamiseksi. n=77. Muuttujan merkitsevyys (p-arvo) on ilmoitettu suluissa.**

Selittäjä/Mallinro	1	2	3	4	5	6	7
Vakio	-64,489 (0,002)	-72,586 (0,001)	50,281 (<0,001)	-70,857 (0,001)	-67,164 (0,120)	-77,762 (0,001)	-44,328 (0,295)
Klpm	10,467 (<0,001)			9,832 (<0,001)	10,559 (<0,001)		
Kpit		13,168 (<0,001)				12,321 (<0,001)	12,002 (<0,001)
Keskijäreys			0,466 (<0,001)				
Runkoluku					0,0008 (0,944)		-0,008 (0,434)
PPA				0,705 (0,430)		0,704 (0,451)	
Selityksaste	0,523	0,494	0,489	0,527	0,523	0,498	0,499

Samalla logiikalla pelkkää selitystasetta verrattaessa harvennuspoistuman tukkiprosenttia selitti parhaiten metsävaratiedon keskijäreys. Tukkiprosenttia selittävien mallien parametrit olivat heikommin merkitseviä korkeahkoista selitystasesta huolimatta, joten mallien hyvyden tarkastelu pelkän selitystasteen ja merkitsevyyden perusteella oli vaikeaa.

**Taulukko 7. Parhaiden mallien parametrien arvot harvennuspoistuman tukkiprosentin ennustamiseksi. n=77. Muuttujan merkitsevyys (p-arvo) on ilmoitettu suluissa.**

Selittäjä/Mallinro	1	2	3	4	5	6	7	8
Vakio	-0,775 (0,487)	-22,45 (<0,001)	1,61 (0,078)	-2,68 (0,032)	-17,63 (0,009)	-20,9 (<0,001)	6,75 (0,130)	5,28 (<0,001)
Tukkiprosentti	0,419 (<0,001)							
Kpit		2,15 (<0,001)			1,96 (<0,001)	2,412 (<0,001)		
Vtuk			0,155 (<0,001)				0,13 (<0,001)	0,17 (<0,001)
Keskijäreys				0,079 (<0,001)				
Runkoluku					0,001 (0,391)		-0,003 (0,045)	
PPA						-0,212 (0,143)		-0,175 (0,216)
Selitystasete	0,523	0,521	0,523	0,553	0,525	0,534	0,548	0,533

### 5.3 Harvennuspoistuman keskijäreyttä ja tukkiprosenttia ennustavien mallien hyvyys riippumattomassa testiaineistossa

Mallien selityskykyä arvioitiin selitystasteen perusteella ja ennusteita ennustevirheen. Keskihajonta ja keskineliövirheen neliöjuuri laskettiin siksi, että mahdollisesti hyvin suurta hajontaa tuottavat mallit havaittaisiin ja että ennustevirheen suuruusluokkaa voitaisiin arvioida (suhteelliset tunnuksat). Mallien keskijäreys oli kuitenkin samankaltaista, eikä suuria poikkeamia ollut. Siten arviointi ennustevirheen suhteen oli mielekästä.

Harvennuspoistuman keskijäreiden malleista laskettiin tilastolliset tunnusluvut taulukoon 8. Metsävaratiedon summapuuston keskiläpimittaan perustuva yhden selittäjän malli tuotti myös parhaat ennusteet. Keskijäreys tuotti hieman enemmän ennustevirhettä,

mutta sen hajonta ja siten RMSE oli pienempää. Keskiläpimitan ja -pituuden mallien antamat ennusteet eivät parantuneet lisäämällä toista selittäjää tai muuntamalla keskiläpimittaa matemaattisesti (ei taulukoitu).

**Taulukko 8. Harvennuspoistuman keskijäreyttä ennustavien mallien hyvyys riippumattomassa testiaineistossa. Mallin laadinta-aineistossa 77 leimikkoo ja testiaineistossa 37 leimikkoo. Mallien parametrien arvot on annettu taulukossa 6.**

Malli nro (selittäjä)	Ennustevirhe (l/runko)	Suhteellinen virhe (%)	Keskijäpimitan hajonta (l/runko)	RMSE (l/runko)	RMSE-%
1 (Klpm)	-6,84	-7,51	26,36	27,23	29,88
2 (Kpit)	-8,85	-9,71	28,12	29,48	32,35
3 (Keskijäveys)	-7,69	-8,44	22,42	23,71	26,01
4 (PPA+Klpm)	-6,97	-7,64	26,60	27,50	30,18
5 (Runko-luku+Klpm)	-6,90	-7,57	26,29	27,19	29,83
6 (PPA+Kpit)	-8,89	-9,76	28,60	29,95	32,86
7 (Runko-luku+Kpit)	-8,00	-8,78	28,31	29,42	32,28

Taulukon 9 mukaan poistuman tukkiprosenttia ennustaa parhaiten metsävaratiedon tukkiprosentti. Tukkitilavuus hehtaarilla, sen kahden selittäjän mallit ja parhaan selityksasteen antanut keskijäveys tuottavat myös alle 1 % ennustevirhettä. Tukkiprosentin, tukkitilavuuden malli tai mikään kahden selittäjän malleista eivät kuitenkaan ole merkitseviä. Keskipituus oli hyvin merkitsevä malli, mutta sen ennusteet eivät yltäneet ensi mainittujen tasolle.

Tukkiprosentin ennustamisessa keskiläpimitaan perustuvan mallin selityksaste jäi taulukoissa esiteltyjä malleja heikommaksi, eikä sitä näin ollen valittu opetusaineistoon mukaan. Keskiläpimittaa kuitenkin käytetään metsävaratiedon laskennoissa keskijäreyden, tukkitilavuuden ja tukkiprosentin estimoinnissa (Holopainen ym. 2011, Metsäkeskus 2022a). Ennusteiden onnistumisen kannalta on siis kuitenkin olennaista, että metsikön keskiläpimitan estimaatti on mahdollisimman tarkka.

**Taulukko 9. Harvennuspoistuman tukkiprosenttia ennustavien mallien hyvyys riippumattomassa testiaineistossa. Mallin laadinta-aineistossa 77 leimikkoa ja testiaineistossa 37 leimikkoa. Mallien parametrien arvot on annettu taulukossa 7.**

Malli nro (selittäjä)	Ennustevirhe (l/runko)	Suhteellinen virhe (%)	Keskihajonta (l/runko)	RMSE (l/runko)	RMSE-%
1 (Tukkiprosentti)	-0,43	-9,14	3,79	3,82	80,77
2 (Kpit)	-1,36	-28,78	3,81	4,04	85,56
3 (Vtuk)	-0,74	-15,68	3,73	3,81	80,55
4 (Keskijäreys)	-0,89	-18,89	3,42	3,54	74,89
5 (Runko- luku+Kpit)	-1,38	-29,28	3,81	4,05	85,72
6 (PPA+Kpit)	-1,42	-30,08	3,73	3,99	84,52
7 (Runko- luku+Vtuk)	-0,73	-15,48	3,64	3,71	78,57
8 (PPA+Vtuk)	-0,72	-15,15	3,66	3,73	79,04

#### 5.4 Selitettävä yhteys järeissä ja pienissä puustoissa

Harvennuspoistuman keskijäreiden ja tukkiprosentin ennustamisen lisäksi 114 korjuulohkoa jaoteltiin järeisiin ja pienipuustoihin lohkoihin. Jaottelulla tutkittiin, miten parhaaksi valikoituneiden metsävaratiedon selittävien muuttujien selitysasteet kehittyvät metsävaratiedon mukaisen puuston järeiden mukaan. Opetus- ja testiaineistoa ei käytetty, vaan vertailtiin selitystasetta ja merkitsevyyttä järeissä ja pienipuustoissa korjuulohkoissa. Jaottelussa oli siis mukana koko aineisto, jotta otanta olisi riittävä.

**Taulukko 10. Aineiston jakautuminen pieniin ja järeisiin puustoihin. Taulukossa kuvattu puustojen ominaisuudet.**

Joukko/Tunnus	Selite	Otannan lohkojen lukumäärä n (kpl)	Keskijäreys metsävaratiedossa (1/runko)	Keskijäreys, hakkuukone (1/runko)	Tukkiprosentti metsävaratiedossa (%)	Tukkiprosentti, hakkuukone (%)
Pienipuustoiset	Rungon koko <80 L metsävaratiedossa	35	54	66,6	5,6	1,5
Järeät puustot	Rungon koko >80 L metsävaratiedossa	79	152	121,4	23,7	9,0

**Taulukko 11. Parametrien arvot harvennuspoistuman keskijäreiden ennustamiseksi metsävaratiedon keskiläpimitalla pienissä ja järeissä puustoissa. Merkitsevyys (p-arvo) on ilmoitettu suluissa.**

Selittäjä/Joukko	Pienet puustot	Järeät puustot
Vakio	23,549 (0,203)	-119,820 (<0,001)
Klpm	3,371 (0,022)	13,433 (<0,001)
Selitysaste	0,149	0,462

**Taulukko 12. Parametrien arvot harvennuspoistuman tukkiprosentin ennustamiseksi metsävaratiedon tukkiprosentilla pienissä ja järeissä puustoissa. Merkitsevyys (p-arvo) on ilmoitettu suluissa.**

Selittäjä/Joukko	Pienet puustot	Järeät puustot
Vakio	1,175 (0,121)	-1,683 (0,234)
Tukkiprosentti	0,061 (0,554)	0,450 (<0,001)
Selitysaste	0,011	0,483

Tuloksien havainto on, että rungon koon pienentyessä harvennuspoistuman keskijäreitä ja tukkiprosenttia ei voida ennustaa edes testiaineistossa hyviksi selittäjiksi havaituilla metsävaratiedon keskiläpimitalla ja tukkiprosentilla. Selitysasteet ja muuttujien merkitsevyys laskevat huomattavasti, eikä alle 80 l/runko kokoluokan nuorissa kasvatusmetsissä kyetä ennustamaan ym. tunnuksia luotettavasti.

## 6. TULOSTEN TARKASTELU JA JOHTOPÄÄTÖKSET

### 6.1 Aineisto

Aineisto koostui metsävaratiedosta ja hakkuukoneella todetuista fyysisesti mitatuista ja kontrolloiduista arvoista, jotka ovat olleet myös puukaupparamaksujen perusteena. Metsävaratieto on samoin standardimuotoista, ja sen tarkkuustavoitteet tunnetaan. Aineistoa saatiin kattavasti koko toiminta-alueelta, ja otannan laajuus oli huomattavasti suurempaa, mitä maastossa olisi kyetty mittaamaan. Sekä metsävaratiedon että hakkuukoneiden mitaustietojen suhteen ihmisen aiheuttaman systemaattisen tai satunnaisen virheen vaikutus tutkimustuloksiin on hyvin vähäinen, ainakin verrattaessa maastossa perinteisin mittausvälinein tehtyihin koealamittauksiin.

Metsävaratietoaineiston heikkoudet liittyvät tiedon ajantasaistukseen ja kiinteistö- ja kuviojaotukseen. Ajantasaistuksen toimintaperiaatteen seurauksena käytössä oli vuoden 2020 metsävaratieto, jonka uusimmat inventoinnit olivat vuodelta 2016 (Metsäkeskus 2021). Uudemmat, esimerkiksi Vaasan seudun ja eteläisen Kristiinankaupungin vuoden 2021 inventoinnit, jäivät pois otannasta, jotta metsikön puustotieto olisi varmasti peräisin ajalta ennen metsänkäyttöilmoituksen aiheuttamaa laskennallista harvennusvaikutusta. Metsävaratiedon ikä aiheuttaa väistämättä virhettä joidenkin havaintoyksiköiden kohdalla, joko kasvumallin ennustevirheen tai virheellisen ajantasaistuksen seuraksena. Riski kasvaa, mitä vanhempaa metsävaratieto on. Toisaalta eri ikäisen ja vanhankin metsävaratiedon käyttö laajensi aineiston otantaa vastaamaan todenmukaista metsävaratiedon käyttötilannetta. Julkisen metsävaratiedon ikä vaihtelee aina inventointiruutujen välillä, eikä saman ikäistä tai yhtenäistä tietoa ole ainakaan tällä hetkellä käytössä millään toimijalla yhtä laajalla alueella.

Kiinteistöjaotuksen ja kuvioinnin aiheuttama virhe on puolestaan seurausta metsävaratiedon inventointitavasta. Kun 16 m\* 16 m inventointiruutujen puustotieto keskiarvoistetaan kuvioiksi ja kuviot rajataan edelleen vierekkäisten ruutujen puustotunnuksista riippumatta kiinteistöittäin, tulee tiedon tarkkuuteen väistämättä virhettä. Virhettä voi myös tulla korjuulohkojen ja metsävaratietojen kuviogeometrioiden erosta. Vaikka geometrioiden täsmävyys tarkastettiin ja epäselvät havaintoyksiköt hylättiin, silmämääräinen ja

pinta-alaan perustuva arviointi ei ole koskaan täysin virheetön ja objektiivinen. Yllä kuvautut metsävaratiedon virhelähteet ovat kuitenkin osa metsävaratiedon käyttöä, ja virheiden sijaan voisi puhua ominaisuuksista, jotka tulee ottaa huomioon aina metsävaratietoa johonkin tarkoitukseen käytettäessä.

Hakkuukonemitattujen tietojen osalta virhelähteitä on vähemmän. Koneiden mittalaitteita kontrolloitetaan ulkopuolisen tahon toimesta vähintään kahdesti vuodessa, ja omavalvontaa suoritetaan useamman kerran viikossa. Mahdolliset virheet voivat olla eri puutavaralajien tilastoinnissa, ei niinkään systemaattisesti virheellisessä mittauksessa. Epäilyttävät mittaustulokset pyrittiin karsimaan otantaa valikoidessa pois. Mittaustuloksen sijaan virhettä tutkimustuloksiin aiheuttaa puuttuva tieto hakkuutavasta. Otantaan kelpuutettiin sekä ensiharvennuksia että harvennuksia erilaisten järeyksien edustettavuuden takia. Harvennuksen toteuttamistapaa ei kuitenkaan voitu suodattaa tarkemmin. Tämä tarkoittaa sitä, että puuvalinnan periaatetta harvennuksessa ei tiedetty. Käytännössä harvennustapoja on kaksi, ala- ja yläharvennus (Tapio Oy 2023). Alaharvennuksessa poistetaan nimensä mukaan pieniä, kasvussa latvuskerroksen alle jääneitä ja heikkolaatuisia puita, kun puolestaan yläharvennuksessa pyritään poistamaan suurempia puita metsikön kiertoaika pidentäen ja hakkuutuloja tasaten (Tapio Oy 2023). Hakkuutapojen ero vaikuttaa merkittävästi poistuman keskijäreyteen ja tukkisaantoon. Oletettavaa kuitenkin on, että suurin osa havaintolohkoista hakattiin alaharvennuksena, sillä toimeksiantajan pääpaino on metsänhoidollisissa hakkuissa perinteisiä suosituksia noudattaen ja koska suurin osa aineistomateriaalista oli ensiharvennusta. Tulokset tukivat myös tätä olettamusta, sillä hakkuukonemitattu keskijäreyys ja tukkiprosentti olivat lähes poikkeuksetta metsävaratiedon summatunnuksia pienempiä. Yläharvennustapaan hakataan käytännössä vain järeämpiä toisia harvennuksia, joissa puuston laatu on selkeämmin määritettävissä ja joissa on riittävästi laadukkaita runkoja myös alemmassa latvuskerroksessa (esim. Metsähallitus 2023).

Hakkuukonemitatun aineiston pahin puute oli erittäin alhainen tukkiprosentti. Muutaman prosentin tukkikertymä on altis poikkeaville arvoille ja muille häiriöille. Koska tukkiprosentti ei ole metsävaratiedossakaan erityisen tarkka tunnus, on pienestä kertymästä vaikea saada mallinnettua kunnollisia ennusteita. Aineiston perusteella lasketut tukkiprosenttiennusteet voivat kyllä absoluuttisesti olla lähellä referenssiarvoa, mutta suhteellinen ennustevirhe on tällöin kuitenkin suuri. Ennustemallin toiminta-alue on myös oletettavasti

hyvin rajallinen. Puutavaralajijakauman luotettavaan ennustamiseen olisi yksinkertaisesti tarvittu enemmän tukkia sisältävä aineisto.

Kokonaisuudessaan aineistot sopivat hyvin tarkoitukseensa ainakin keskijäreyden osalta. Havaintoja oli runsaasti, maantieteellisesti kattavasti ja korjuulohkojen ominaisuudet olivat vaihtelevia tukkipitoisten lohkojen puuttumista lukuun ottamatta. Tutkimuksessa käytetyillä aineistoilla saatiin vaihtoehtoisiin tiedonkeruumenetelmiin verrattuna varsin kattava objektiivinen otos, jonka sisältämä tieto oli käyttökelpoista ja virhelähteet etukäteen tiedossa ja siten hallittavissa. 114 korjuulohkoa ja lohkokohtainen metsävaratieto riittivät antamaan kattavan kuvan hakattavista kohteista ja käytännön soveltamistilanteesta.

## 6.2 Tutkimusmenetelmä

Tutkimusmenetelmä perustui lineaariseen regressiomallinnukseen, jossa hakkuukoneella mitattu tunnus oli vastemuuttuja, jonka vaihtelua selitettiin metsävaratiedon muuttujilla. Aluksi suuresta määrästä metsävaratiedon muuttujia haarukoitiin potentiaalisesti parhaat selittäjät, joista tehtiin mallit opetusaineistossa. Opetusaineistojen selityskykyä koetettiin laskemalla ennusteet testiaineiston korjuulohkojen keskijäreydelle ja tukkiprosentille.

Lineaarinen regressiomallinnus perustuu ennustearvojen residuaalien, eli virhetermien neliösumman minimointiin. Tilasto-ohjelma optimoi pienimmän neliösumman, eli laskee mallin muuttujille parametrit, joilla mallin antama ennustevirhe aineiston sisällä on pienin. Linearisessa tapauksessa mallin vastemuuttuja vaihtelee suoraviivaisesti, eli sen funktio on ensimmäisen asteen funktio ja kuvaaja suora. Tutkimustapauksessa lähtöoletus oli, että regressiomallinnusta voidaan käyttää, koska mallinnus on kehitetty vastaavien ongelmien ratkaisuun, joissa selittäjästä  $x_1$  ja/tai  $x_2$  saadaan laskettua joillain parametreilla vastemuuttuja  $y$ . Korjuulohkojen voidaan olettaa myös olevan normaalijakautuneita, ja suuresti poikkeavat havainnot pyrittiin karsimaan aineistosta pois, jotta regressiomallin nk. standardioletukset täyttyisivät mahdollisimman hyvin. Regressiomallin todettiin myös olevan riittävän yksinkertainen kuvaamaan tutkittavaa ilmiötä ja siten sopiva myös käytännön sovelluksiin.

Menetelmä onnistui tuottamaan keskijäreydelle malleja, joiden selitysaste oli parhaimmillaan yli 50–60 % ja parametrit selvästi alle 5 % merkitsevyysrajan. Mallit olivat kuitenkin n. 10 % suhteellista yliarviota tuottavia. Tukkiprosentille kyettiin luomaan malli, josta ainakin selittäjän parametri oli alle merkitsevyysrajan, mutta vakio tai kokeiltu toinen selittäjä puolestaan ei. Selitysasteet olivat samaa luokkaa keskijäreyden mallien kanssa, mutta ennustevirhe etenkin suhteellisesti erittäin suurta. Absoluuttisesti virhe ei kuitenkaan ollut montaakaan prosenttiyksikköä. Keskijäreyden virheen ylipäätään ja mallien antamien ennusteiden systemaattisen yliarvion voidaan kuitenkin olettaa johtuvan enemmän opetus- ja testiaineiston järeyserosta (Taulukko 5) ja tukkiprosentin ennustevirheen aineiston erittäin alhaisesta tukin määrästä, enemmän kuin virheellisestä mallintamismenetelmästä. Toimeksiantajan tapauksessa metsänhoidollisten hakkuiden vähäisen tukkikertymän arviointiin sopii jokin regressiomallia yksinkertaisempi menetelmä, koska määrä on joka tapauksessa pieni eikä tämän tutkimuksen malleilla voida luotettavasti ennustaa enemmän tukkia sisältävien leimikoiden puutavaralajijakaumaa. Osittain improvisoidussakin tutkimusmenetelmässä oli siis puutteensa, mutta menetelmällä löydettiin kuitenkin vahvat selittäjät vastemuuttujille.

### 6.3 Tulokset

Tuloksien perusteella kyettiin vastaamaan asetettuihin tutkimuskysymyksiin seuraavasti:

#### 1. Kuinka hyvin harvennusleimikon poistuvan puuston keskijäreyys ja tukkiprosentti pystytään ennustamaan avoimesta metsävaratiedosta?

Keskijäreyys pystyttiin ennustamaan avoimesta metsävaratiedosta alle 10 l/runko ja tukkiprosentti yhden prosenttiyksikön tarkkuudella tutkimuksen viitekehyksessä. Suhteellisesti tämä tarkoittaa poistuman keskijäreydessä alle 10 % ennustevirhettä, tukkiprosentissa suhteellinen virhe on lähes 80 %, joskin suhteellisen arvon mielekkyyttä alentaa lähekkökohtaisesti aineiston pieni tukkiprosentti. Mallien selitysaste jäi noin 50 %:n tasolle.

**2. Löytyykö jotain sellaista yksittäistä avoimen metsävaratiedon tunnusta, joka selkeästi parhaiten selittää poistuvan puuston keskijäreyttä ja/tai tukkiprosenttia? Entä eri tunnusten yhteisvaikutuksia? Esimerkkeinä puustotunnuksista keskipituus, keskiläpimitta tai lehtipuun osuus.**

Hakkuukoneella mitattua harvennuspoistuman keskijäreyttä selitti parhaiten metsävaratiedon tunnuksista summapuuston keskiläpimitta. Tukkiprosentin paras selittäjä oli metsävaratiedon laskennallinen keskijäreys, joskin tarkimmat ennusteet tuotti metsävaratiedon tukkiprosentti. Tukkiprosentin ennustaminen luotettavasti ja mallien välinen vertailu oli vaikeaa. Poistuman keskijäreiden osalta vertailua mallien välillä kyettiin tekemään paremmin - keskiläpimittaan perustuva malli oli pituuteen pohjautuvaa parempi. Kokonaistilavuudesta ja runkoluvusta laskettu metsävaratiedon keskijäreys oli myös vahva selittäjä sekä keskijäreiden että tukkiprosentin tapauksessa, mutta sen ongelmallisuus esimerkiksi havaitun keskijäreiden suhteen on se, että malli ei anna arvoja alle vakiotermin (50,3 l/runko). Vahvasta selitysasteesta huolimatta testiaineiston ennusteista laskettu ennustevirhe oli keskijäreydellä suurempi kuin keskiläpimitalla tai poistuman tukkiprosentin tapauksessa metsävaratiedon tukkiprosentilla. Keskijäreyttä ei myöskään saada mistään metsäjärjestelmästä suoraan, toisin kuin esimerkiksi keskiläpimittaa, vaan se pitää erikseen laskea, mikä heikentää käytännön sovellettavuutta. Metsäjärjestelmät laskevat kyllä poistuman keskijäreyttä läpimittajakaumista, mutta tutkimuksen tavoite oli kehittää menetelmälle suoraviivaisempi vaihtoehto.

**3. Voidaanko määrittää runkohinnoitteluun soveltuvia/soveltumattomia leimikoita?**

Voidaan. Keskimäärin toimivien tukkiprosentti- ja keskijäreysennusteiden saaminen edellyttää riittävää järeyttä. Tutkimuksen perusteella metsävaratiedosta lasketut ennusteet ovat jokseenkin luotettavia järeissä puustoissa, jolloin saatiin luotua merkitseviä ja selitysvoimaisia keskijäreiden ja tukkiprosentin malleja. Alhaisilla (alle 80 l/runko) järeysillä ennustaminen oli sen sijaan mahdotonta. Niin pienissä puustoissa ennustamisen epäluotettavuus ei puun hinnoittelun suhteen kuitenkaan ole suuri ongelma, koska poistuma on varmuudella lähes täysin kuitu- ja energiapuuta. Pienirunkoisissa ensiharvennuksissa on siis puutavaralajeittain hinnoiteltaessakin käytännössä runkohinnoittelu käytössä. Tukkiprosentin suhteen on jälleen syytä muistaa aineiston alhainen tukin osuus. Eli

vaikka varttuneemmissa puustoissa tukkiprosenttia kyetään kyllä ennustamaan, on mallien käyttöalue mitä luultavimmin melko rajallinen.

Pienten puustojen osalta epäjatkuvuuskohdaksi jäi kuitenkin korjuukelpoisuuden toteaminen, eli se, että keskijäreys on koneelliseen hakkuuseen riittävä. Sen toteamiseen tuloksista ei saatu vastausta, koska myös keskijäreiden ennustaminen oli mahdotonta metsävaratiedon mukaan alle 80 litraisissa puustoissa.

#### **6.4 Johtopäätökset**

Yleisesti tuloksista voidaan sanoa, että ne ovat hyvin linjassa aiemman aiheeseen liittyvän tutkimuksen kanssa. Metsävaratiedon tarkkuus ja sen käyttökelpoisuus paranivat metsiköiden järeytyessä aiemmin tiedetyn mukaisesti (Maaninka 2021, Metsäkeskus 2022a). Myös keskiläpimitan osoittautuminen parhaaksi keskijäreiden selittäjäksi on linjassa aiemman tutkimuksen ja käytännön kanssa. Esimerkiksi Laasasenahon (1982) tilavuusyhtälöt käyttävät yksinkertaisimmillaan keskiläpimittaa tilavuuden ennustamiseen, ja keskiläpimitan käytöstä käytännön metsätaloudessa on myös olemassa useita peukalo-sääntöjä. Metsävaratiedossa keskiläpimitalle luvataan vain  $\pm 20\%$  tarkkuus, mutta vahva riippuvuus sen ja puun tilavuuden välillä tuottaa silti tarkimpia tilavuusennusteita (Laasasenaho 1982). Tukkiprosentin osalta tuloksia on vaikea verrata aiempaan tutkimukseen. Tapion Maastotaulukoissa (2022) tukkiprosenttia selitetään keskiläpimitalla, joka ei tässä tutkimuksessa kuitenkaan ollut paras selittäjä. Toisaalta parhaita ennusteita tuottaneet metsävaratiedon tukkiprosentti ja laskennallinen keskijäreys ovat keskiläpimitasta johdettuja tunnuksia (Holopainen ym. 2011; Metsäkeskus 2022a). Aineistossa ja ylipäätään toimeksiantajan puunhankinnassa tukin osuus hakkuukertymästä on niin pieni, että mallien hyvyyden arviointi on hankalaa ja osittain myös tarpeetonta. Tukkiprosenttia paremmin ennustavien mallien laadintaan tarvittaisiin erilainen, runsaammin tukkia sisältävä aineisto. Puutavaralajijakauman todellinen ennustaminen jäi tällä aineistolla valitettavan keskeneräiseksi, ja mallien käyttökelpoisuus keskittyi poistuman keskijäreiden ennakoarvioitiin. Käytännön sovelluksessa tukkiprosentin ollessa lähellä nollaa hinnanmuodotukseen tarvittava tieto on keskijäreiden, metsäkuljetusmatkan ja puulajisuhteiden arviointia, joihin tämä tutkimus, metsävaratiedon puulajitulkinnan onnistumista arvioivat muut tutkimustulokset ja olemassa olevat karttatyökalut tarjoavatkin paremmat lähtökohdat. Täysin käyttökelvottomia tukkiprosentin ennusteet eivät kuitenkaan ole, sillä pientä määrää ennustettaessa millä tahansa menetelmällä merkittävän suhteellisen virheen riski

on suuri. Mm. Malisen & Kilpeläisen (2013) esille tuomat haasteet puutavaralajien jakauman ennakkoarvioista ovat silti edelleen voimassa, eikä metsävaratiedon tarkkuus riitä ainakaan vielä laatutunnusten arviointiin. Suurella hakkuukonemitatulla aineistolla tehdyin tukkiprosenttimallin käyttäjä saisi todennäköisesti varautua hajontaan, vaikka keskimääräinen ennustevirhe saataisiinkin lähelle nollaa.

Etenkin keskijäreyden osalta mallien antamien ennusteiden tarkkuus on yllättävän hyvä, ottaen huomioon metsävaratiedon vaihtelevan vanhan iän ja harvennushakkuun puuvallinnan tekijästäkin riippuvan vaihtelun. Aineisto ei ollut miltään alueelta kovinkaan uutta, tuoreimmiltaan vuodelta 2016, eli neljä vuotta vanhaa. Vanhimmat inventoinnit olivat vuodelta 2012. Metsävaratiedon automaattinen päivitys rajoitti uudemman aineiston käyttöä. Siksi alle 10 % suhteellinen ennustevirhe on hyvä tulos, varsinkin, kun selitettävä yhteys ei ole aivan suoraviivainen. Aineiston valinta eri inventointiajankohtien alueilta vahvistaa oletusta siitä, että mallit antavat kohtalaisia tuloksia edelleen metsävaratiedon yhä päivittyessä uusien inventointien myötä. Tätä tutkimusta voisikin kehittää toteuttamalla vastaavanlaisen mallinnuksen runsaammin tukkia sisältävällä aineistolla ja uudemmalla metsävaratiedolla. Kuviotason sijaan voisi myös käyttää esimerkiksi hilaruutuja, jotta inventointitiedon keskiarvoistuksen vaikutus tuloksiin poistuisi ja siten lähtötiedon virhelähteiden määrä vähenisi. Huomattavaa ennusteissa oli kohtalaisen suuri keskihajonta, joka kasvattaa myös RMSE:n arvoa. Hajonta ei kuitenkaan välttämättä aiheuta käytännön puunhankinnassa suurta ongelmaa, koska keskimääräinen ennustetarkkuus on ratkaisevaa yksittäisten korjuulohkojen tunnusten ennakkoarvioinnin onnistumisen sijaan, kun korjuulohkoja hakataan vuosittain satoja ja tuhansia. Alhaiset mallien selityksasteet sen sijaan voivat olla käytännössä suurempi ongelma, koska niiden aiheuttama epävarmuus on satunnaista. Joka tapauksessa tutkimuksessa luodut mallit haastavat subjektiivisen silmävaraisen arvioinnin ainakin keskijäreyden osalta. Mallilla ennustettu arvo on koko suunnitellulta hakkuualueelta laskettu objektiivinen tulos, joka on osoitetusti varsin tarkka puuston ollessa tarpeeksi järeää. Vaikka kokeneen metsätoimihenkilön silmämääräinen arvio on parhaimmillaan erittäin tarkka ja täsmällinen, karsii metsävaratiedon käyttö subjektiivisen tekijän pois ja laajentaa arvion perusteena olevaa otantaa koko leimikon laajuudelle muutaman koekalan sijaan. Tulokset vahvistavat osaltaan metsäalan suuntausta kohti kaukokartoitus pohjaisten mittausten ja aputyökalujen käyttöä.

## 7. LÄHTEET

- Ala-Fossi, A. 2003. Puun hinnoittelusta riippumattoman katkonnan vaikutukset kuusitukien jakaumaan ja jalostusarvoon. Pro gradu-tutkielma. Joensuun yliopisto.
- Evans, J. & Turnbull, J. 2004. Plantation Forestry in the Tropics. Oppikirja.
- Hansen, M. & Loveland, T. 2012. A review of large area monitoring of land cover change using Landsat data. Remote Sensing of Environment. Volume 122, Pages 66-74. ISSN 0034-4257. Saatavilla: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.08.024>.
- Harikumar, A. 2020. Advanced methods for tree species classification and biophysical parameter estimation using crown geometric information in high density LiDAR data. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/342376734\\_Advanced\\_methods\\_for\\_tree\\_species\\_classification\\_and\\_biophysical\\_parameter\\_estimation\\_using\\_crown\\_geometric\\_information\\_in\\_high\\_density\\_LiDAR\\_data](https://www.researchgate.net/publication/342376734_Advanced_methods_for_tree_species_classification_and_biophysical_parameter_estimation_using_crown_geometric_information_in_high_density_LiDAR_data).
- Holopainen, M., Hyypä, J., Vastaranta, M. & Hyypä H. 2011. Laserkeilaus metsävarojen hallinnassa. The Photogrammetric Journal of Finland. Saatavissa: [https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf\\_e/2011/PJF2011\\_3\\_Holopainen\\_et\\_al.pdf](https://foto.aalto.fi/seura/julkaisut/pjf/pjf_e/2011/PJF2011_3_Holopainen_et_al.pdf).
- Holopainen, M., Tokola, T., Vastaranta, M., Heikkilä, J., Huitu, H., Laamanen, R. & Alho, P. 2015. Geoinformatiikka luonnonvarojen hallinnassa. Metsätieteiden laitoksen julkaisuja 7. Oppikirja. Saatavissa: [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/166765/GIS\\_kirja\\_kansineen\\_netti.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/166765/GIS_kirja_kansineen_netti.pdf?sequence=1&isAllowed=y).
- Hyypä, H. & Hyypä, J. 1999. Comparing the accuracy of laser scanner with other optical remote sensig data sources for stand attribute retrieval. The Photogrammetric Journal of Finland, Vol. 112.

- Junttila, S. 2019. Utilizing multispectral lidar in the detection of declined trees. *Dissertationes Forestales* 277. Saatavissa: <https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/301795/Utilizin.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Jylhä, P., Dahl, O., Laitila, J. and Kärhä, K. 2010. The effect of supply system on the wood paying capability of kraft pulp mill using Scots pine harvested from first thinnings. *Silva Fennica* 44(4): 695-714. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/532710>.
- Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M. & Korpunen, H. 2019. Koneellinen hakkuu: Seurantatutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.
- Karppinen, H., Hänninen, H. & Horne, P. 2020. Suomalainen metsänomistaja 2020. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 30/2020. Luonnonvarakeskus. Saatavissa: [luke-luobio\\_30\\_2020%20\(1\)](luke-luobio_30_2020%20(1)).
- Kontinen, K., Kotiharju A. & Vanhatalo, K. (toim.) 2019. Metsänhoidon suositukset puukauppakohteen laadintaan, työopas. Tapion julkaisu. Saatavissa: [https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon\\_suosituksien\\_laadintaan\\_Tapio-2019.pdf](https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon_suosituksien_laadintaan_Tapio-2019.pdf).
- Kivinen, V-P. 2022. Metsäteollisuuden puuhuolto. Luentomateriaali. Helsingin yliopisto.
- Kuitto, P-J, Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Metsätehon tiedotus. Saatavissa: [https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/tiedotus-1994\\_410-compressed.pdf](https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/tiedotus-1994_410-compressed.pdf).
- Kärhä, K., Nurmela, S., Karvonen, H., Kivinen, V-P., Melkas, T. & Nieminen, M. 2019. Estimating the accuracy and time consumption of a mobile machine vision application in measuring timber stacks. *Computers and Electronics in Agriculture*, vol. 158, pp. 167-182. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.01.040>

- Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce, and birch. Saatavissa: <https://jukuri.luke.fi/handle/10024/522516>.
- L 534/1998. Laki metsänhoitoyhdistyksistä. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa: <https://www.finlex.fi/fi/laki/ajantasa/1998/19980534>. [Viitattu 20.6.2023].
- L 414/2013. Laki puutavaran mittauksesta. Valtion säädöstietopankki Finlex. Saatavissa: <https://finlex.fi/fi/laki/alkup/2013/20130414>. [Viitattu 10.2.2023].
- Luonnonvarakeskus. 2020. Teollisuuspuun kauppatilaston laatuseloste. Verkkodokumentti. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/teollisuuspuun-kauppa/teollisuuspuun-kauppatilaston-laatuseloste>. [Viitattu 30.1.2023].
- Luonnonvarakeskus. 2023a. Valtakunnan metsien inventointi. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/seurannat/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi/valtakunnan-metsien-inventointi-vmi-kuvaus#tuloksia>. [Viitattu 15.4.2023].
- Luonnonvarakeskus. 2023b. Teollisuuspuun kauppa 2022. Tilasto. Saatavissa: <https://www.luke.fi/fi/tilastot/teollisuuspuun-kauppa/teollisuuspuun-kauppa-2022>. [Viitattu 20.5.2023].
- Maa- ja metsätalousministeriö. 2023. Metsävaratiedot. Saatavissa: <https://mmm.fi/metsat/metsavaratiedot>. [Viitattu 12.4.2023].
- Maaninka, V. 2021. Metsävaratiedon kaukokartoitusaineistojen luotettavuus ja hyödyntäminen Opinnäytetyö. Saatavissa: [https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/496409/Maaninka\\_Veikko.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/496409/Maaninka_Veikko.pdf?sequence=3&isAllowed=y).
- Maanmittauslaitos. 2023. Laserkeilaus ja ilmakuvaus. Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/laserkeilaus-ja-ilmakuvaus>. [Viitattu 10.6.2023].
- Maaseudun Tulevaisuus. 2021. Runkohinnoittelu yleistyy – Se voi helpottaa kaupankäyntiä, mutta metsänomistajan kaikkia riskejä se ei poista. Artikkelit. Saatavissa:

<https://www.maaseuduntulevaisuus.fi/metsa/e91fafde-6ac9-5318-b267-e7411d4d480c>. [Viitattu 31.1.2023].

Malinen, J., Haring, M., Kilpeläinen, H. & Verkasalo, E. 2015. Comparison of alternative roundwood pricing systems – a simulation approach. *Silva Fennica* 49(3), article id 1293. Saatavissa: <http://dx.doi.org/10.14214/sf.1293>.

Malinen, J. & Kilpeläinen, H. 2013. Price Systems for Standing Sales of Industrial Roundwood in Finland. *Baltic Forestry* 19(2): 307-315. Saatavissa: [https://www.researchgate.net/publication/284512773\\_Price\\_Systems\\_for\\_Standing\\_Sales\\_of\\_Industrial\\_Roundwood\\_in\\_Finland](https://www.researchgate.net/publication/284512773_Price_Systems_for_Standing_Sales_of_Industrial_Roundwood_in_Finland).

Maltamo, M., Peuhkurinen, J., Malinen, J., Vauhkonen, J., Packalén, P. & Tokola, T. 2009. Predicting tree attributes and quality characteristics of Scots pine using airborne laser scanning data. *Silva Fennica* 43(3): 507–521. Saatavissa: <https://juri.luke.fi/bitstream/handle/10024/532685/maltamo.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.

Melkas, T. 2018a. Tukkien mittaus sahalla. Metsätehon opas. Saatavissa: <https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-tehtaalla/tukkien-mittaus-sahalla/>.

Melkas, T. 2018b. Mittaus ja laatu-opas. Metsätehon opas. Saatavissa: <https://puuhuolto.fi/mittaus-ja-laatu/mittaus-maastossa/hakkuukonemittaus/mittausmenetelma/>.

Metsä Group. 2023. Järeysrunkohinta. Saatavissa: <https://www.metsagroup.com/fi/puunhankinta/puukauppa-ja-metsanhoitopalvelut/pyyda-tarjous-puukaupasta/jareysrunkohinta/>. [Viitattu 15.6.2023].

Metsähallitus. 2023. Kymmenys lisää tukkia – Metsähallitus innostunut yläharvennuksesta. Suullinen tiedonanto Metsälehdessä artikkeliin 30.10.2023. Saatavissa: <https://www.metsalehti.fi/artikkelit/ylaharvennuksella-kymmenys-lisaa-tukkia/#aef46366>. [Viitattu 15.11.2023].

- Metsäkeskus. 2020. Tarkemmat menetelmät käyttöön metsävarojen inventoinnissa. Mediatiedote. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/ajankohtaista/tarkemmat-menetelmat-kayttoon-metsavarojen-inventoinnissa>. [Viitattu 10.2.2023].
- Metsäkeskus. 2021. Metsävarakuviot, tietotuotekuvaus. Verkkodokumentti. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tietotuotekuvaus-metsavarakuviot.pdf>. [Viitattu 30.1.2023].
- Metsäkeskus. 2022a. Metsävaratiedon laatuseloste. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/metsavaratiedon-laatuseloste.pdf>. [Viitattu 8.2.2023].
- Metsäkeskus. 2022b. Tietojen ylläpito-sivusto. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/tietojen-yllapito>. [Viitattu 31.1.2023].
- Metsäkeskus. 2023. Hila-aineisto. Verkkomateriaali. Saatavissa: <https://metsakeskus.maps.arcgis.com/apps/MapSeries/index.html?appid=939611e06ad7406a8c464445c62a387f>. [Viitattu 20.4.2023].
- Metsäkeskus. 2023. Tietoa meistä: <https://www.metsakeskus.fi/fi/tietoa-meista/metsakeskus>. [Viitattu 16.4.2023].
- Naesset, E. 1997. Estimating timber volume of forest stads using airborne laser scanner data. *Remote sensing of Environment*, Vol 61, No. 2, s. 246-253.
- Nelson, R., Krabill, W. & Maclean, G. 1984. Determining forest canopy characteristics using airborne laser data. *Remote Sensing of Environment* 15: 201–212. Saatavissa: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0034425784900312>.
- Ovaskainen, H. 2022. Hinnoittelumenetelmät. Metsätehon opas. Saatavissa: <https://puu-huolto.fi/korjuun-suunnittelu/puukauppa/hinnoittelumenetelmat/>.

- Peuhkurinen, J., Maltamo, M. & Malinen, J. 2008. Estimating species-specific diameter distributions and saw log recoveries from ALS data and aerial photographs: a distribution-based approach. *Silva Fennica* 42(4): 625–641. Saatavissa: <https://juku.kuri.luke.fi/bitstream/handle/10024/532662/estim.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Ruotsalainen, R., Pukkala, T., Kangas, A., Vauhkonen, J., Tuominen, S. & Packalen, P. 2019. The effects of sample plot selection strategy and the number of sample plots on inoptimality losses in forest management planning based on airborne laser scanning data. *Canadian Journal of Forest Research*. 49(9): 1135-1146. Saatavissa: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2018-0345>.
- Räsänen, T., Melkas, T., Riekkö, K., Sorsa, J.-A., Poikela, A & Hämäläinen, J. 2019. Hakukoneet tiedon tuottajina. *Metsätieteen aikakauskirja*, artikkeli id 10250. Saatavissa: <https://doi.org/10.14214/ma.10250>.
- Strandström, M. 2022. Puunkorjuu ja kaukokuljetus Suomessa vuonna 2021. *Metsätehon tulosalvosarja* 5/2022. Saatavissa: <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Tulosalvosarja-2022-05-Puunkorjuu-ja-kaukokuljetus-vuonna-2021.pdf>.
- Sirén, M. & Aaltio, H. 2003. Productivity and costs of thinning harvesters and harvester-forwarders. *Journal of Forest Engineering* 14(1): 39–48. [Verkköjulkaisu] Saatavilla: <http://journals.hil.unb.ca/index.php/IJFE/article/view/9881>.
- Skogsforum 2022. Svenska skotarmarknaden 2021 bromsad av global högkonjunktur. Artikkel. Saatavissa: <https://iskogen.se/skogsbruk/svenska-skotarmarknaden-2021-bromsad-av-global-hogkonjunktur/>. [Viitattu 10.6.2023].
- Skogsstyrelsen 2022. Fastighets- och ägarstruktur i skogsbruk. Tilasto. Saatavissa: <https://www.skogsstyrelsen.se/statistik/statistik-efter-amne/fastighets--och-agarstruktur-i-skogsbruk/>. [Viitattu 10.6.2023].
- Tapio Oy. 2022. Maastotaulukot. Versio 1.0.3. Saatavissa: <https://app.maastotaulukot.fi/>.

- Tapio Oy. 2023. Metsäsuunnittelun maastotyöopas. Saatavissa: <https://tapio.fi/wp-content/uploads/2023/02/Metsasuunnittelun-maastotyöopas.pdf>.
- Uusitalo, J. 2004. Puunhankinnan johtamisen perusteet – kurssimoniste. Joensuun yliopisto. Saatavissa: [Puunhankinnanjohtaminen-kurssimoniste](#).
- Uusitalo, J. 2016. Rungonosahinnoittelu. Luonnonvarakeskuksen kalvosarja. Saatavissa: <https://docplayer.fi/58639023-Rungonosahinnoittelu-jori-uusitalo-luke-mmm-puukauppatyoryhma.html>.
- Uusitalo, J. & Kivinen, V-P. 2023. Metsäteknologian perusteet. Oppikirja.
- Väätäinen ym. 2005. Hakkuukoneenkuljettajan hiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 937. Saatavissa: [Saata-vissa: https://jukuri.luke.fi/handle/10024/521571](https://jukuri.luke.fi/handle/10024/521571)

