

LAPPEENRANNAN-LAHDEN TEKNILLINEN YLIOPISTO LUT
LAPPEENRANTA-LAHTI UNIVERSITY OF TECHNOLOGY LUT

LUT School of Energy Systems
Bioenergian laboratorio

LUT Scientific and Expertise Publications

Tutkimusraportit – Research Reports

139

Mika Aalto, Kyösti Turkia, Kirsi Malmstedt,
Arun Gyawali & Tapio Ranta

PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin

 LUT
University

PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin



ISBN 978-952-335-815-7 (PDF)
ISSN-L 2243-3376
ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2022



Vipuvoimaa
EU:lta
2014–2020



ALKUSANAT

Tämä julkaisu on Lappeenrannan-Lahden teknillisen yliopiston LUT tuottama loppuraportti tutkimushankkeelle: “PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin”. PUUSTI-hankkeessa tutkittiin keinoja purkaa ensiharvennus ja nuoren metsän kunnostus rästejä. Hankkeessa tarkasteltiin mahdollisuuksia kaukokartoittaa nuoria metsiä lennökkikuvauksien avulla. Tarkastelun kohteena oli myös uusi harvennus menetelmä ”käytäväharvennus”, joka tunnetaan myös nimellä väyläharvennus. Menetelmää tutkittiin käytännön harvennus kokeilla ja simulaatiomallilla. Hankkeen tuloksia tuotiin metsän omistajien ja metsäalantoimijoiden tietoon järjestämällä metsäretkiä harvennuskohteille, joissa uutta harvennus tapaa oli käytetty. Tämän lisäksi kaukokartoituksen avulla luotiin opittevä koulutus simulaattoriin, jossa Esedun opiskelijat suorittivat käytäväharvennus tehtäviä.

Puhallus-hanke oli LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmän, Suomen metsäkeskus ja Etelä-Savon ammattiopisto Esedu toteuttama tutkimushanke. Hankeen vastuullisena johtajana toimi prof. Tapio Ranta ja projektipäällikkönä TkT Mika Aalto. Hankkeen toteutukseen osallistuivat LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmästä projektitutkijat Rabins Gaudel ja Arun Gyawali. Esedulta hankkeen toteuttamiseen osallistui Kirsi Malmstedt ja Metsäkeskukselta Kyösti Turkia ja paikkatietoasiantuntija Jyrki Lehtinen metsävaratiedon käsittelyn osalta. Lisäksi toteutukseen osallistui diplomi-insinöörin lopputyön toteuttanut LUT-yliopiston opiskelija Juho Haapalainen.

Hankkeen toteutusaika oli 2.09.2019–31.12.2021. Hanketta rahoittivat Etelä-Savon ELY-Keskus Manner-Suomen maaseudun kehittämissuunnitelmasta ja Suur-Savon Energiasäätiö. Hankkeen muina rahoittajina toimivat Etelä-Savon Energia Oy, Metsäteho Oy ja Metsänhoitoyhdistys Etelä-Savo, sekä yhteistyökumppaneina Ponsse Oy, SKAL ry ja MTK ry. Tutkimustyön toteuttajat kiittävät hankkeen rahoittajia työn mahdollistamisesta sekä organisaatioista mukana olleita ohjausryhmän jäseniä arvokkaasta työpanoksestaan ja aktiivisesta yhteistyöstään PUUSTI-hankkeessa suoritettuja tutkimustoimenpiteitä kohtaan.

Mikkelissä, tammikuu 2022

Tekijät

TIIVISTELMÄ

Tekijät: Mika Aalto, Kyösti Turkia, Kirsi Malmstedt, Arun Gyawali & Tapio Ranta

Otsikko: PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin

Vuosi: 2022

Paikka: Lappeenranta

LUT Scientific and Expertise Publications
Tutkimusraportit – *Research Reports*, 139

43 sivua, 19 kuvaa, 6 taulukkoa

Hakusanat: Käytäväharvennus, Kaukokartoitus, Nuoren metsän hoito, Ensiharvennu, Simulointi.

PUUSTI - Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin hanke toteutettiin tehostamaan Etelä-Savon maakunnan metsätaloutta. Hankkeessa etsittiin keinoja purkaa ensiharvennuksen ja nuoren metsän kunnostusrästejä sekä tuottaa lisää metsäteollisuuden ja energiantuotannon tarvitsemää puuta myös tulevaisuudessa. Näin voidaan turvata metsätalouden kestävyyttä ja vahvistaa maakunnan aluetaloutta.

Hankkeessa toteutettiin ilmakuvaus ja laserkeilaus lennokin avulla. Lennokkikuvauksien tulokset olivat tarkempia kuin avoimen metsävaratietueen. Tarkempien lennokkikuvauksien avulla luotiin palstasta puustotietue, jota voitiin hyödyntää hankkeessa kehitetyssä simulointimallissa ja opetussimulaattorissa. Metsänhoito suunnitelmien laatimiseen avoin metsävaratietue todettiin riittävän tarkaksi, mutta tarkempi lennokkikuvaus mahdollistaa laajojen alueitten tarkan mittaamisen tutkimus ja opetuskäyttöön.

Hankkeessa demonstroitiin käytäväharvennus menetelmää kahdella testipalstalla. Harvennuksien jälkeen palstoille suoritettiin metsäretkiä, joissa esiteltiin käytäväharvennus menetelmää metsäalan toimijoille ja metsänomistajille. Tämän lisäksi nuorten metsien omistajiin oltiin yhteydessä aktivointikampanjassa.

Käytäväharvennus menetelmä todettiin olevan mahdollinen tapa purkaa nuorten metsien korjuurästejä. Tarkempi tarkastelu menetelmän sopivuudesta erityyppisille kohteille on tarpeen ja korjuun jäljen erilaisuuden vaikutus menetelmän vastaanottoon metsänomistajien keskuudessa olisi selvitettävä.

ABSTRACT

Authors: Mika Aalto, Kyösti Turkia, Kirsi Malmstedt, Arun Gyawali & Tapio Ranta

Title: PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin

Year: 2022

Place: Lappeenranta

LUT Scientific and Expertise Publications
Tutkimusraportit – *Research Reports*, 139

43 pages, 19 figures, 6 tables

Keywords: Boom-corridor thinning, Remote sensing, Young forest, First thinning, Simulation.

The project, "PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin" was implemented in the province of Southern Savonia to improve forestry efficiency. The project aimed to eliminate debt with first thinning and rehabilitation of young forests, as well as produce more wood for the forest industry and energy production in the future. This will ensure forestry's long-term viability while also bolstering the province's regional economy.

Aerial photography and laser scanning were part of the project, which was done with the help of a drone. The drone surveys yielded more accurate results than the open forest resource record. A forest record was created from the plot with the help of more detailed drone surveys, which could be used in the project's simulation model and teaching simulator. Although an open forest resource record was found to be adequate for the preparation of forest management plans, more precise drone surveys allow for accurate measurement of large areas for research and teaching purposes.

Two test plots were used to demonstrate the boom-corridor thinning method. Following the thinning, demonstrations were conducted on the plots, where forest industry operators and forest owners were introduced to the method of the boom corridor thinning. In addition, young forest owners were contacted during the activation campaign.

The method of corridor thinning was discovered to be a viable option for clearing harvest debts in young forests. More research into the method's suitability for various types of sites, as well as forest owners' acceptance of the harvest imprint, is required.

SISÄLLYSLUETTELO

1	PUUSTI-HANKE.....	5
1.1	Hankkeen tausta.....	5
1.2	Hankkeen tavoitteet ja kohderyhmä	6
1.3	Hankkeen toteutus	7
1.4	Tutkimusraportin rakenne.....	7
2	KÄYTTÄVÄHARVENNUS MENETELMÄ	9
2.1	Menetelmän kuvaus	9
2.2	Demonstraatio harvennukset	10
2.3	Kokemukset ja kommentit.....	14
2.4	Tulokset ja keskustelu.....	16
2.5	Johtopäätökset.....	18
3	KAUKOKARTOITUS	19
3.1	Käytetyt menetelmät	19
3.2	Ilmakuvaus lennokilla.....	19
3.3	Laserkeilaus lennokilla	22
3.4	Avoin LiDAR-data	23
3.5	Kenttämittaukset	24
3.6	Biomassan ja tilavuuden laskeminen.....	24
3.7	Tulokset ja keskustelu.....	25
3.8	Johtopäätökset.....	28
4	SIMULOINTI JA SIMULAATTORIAJOT	29
4.1	Simulointi ja simulaattori	29
4.2	Simulointimallin tuloksia.....	31
4.3	Simulaattoriajojen merkitys.....	32
4.4	Johtopäätökset.....	34
5	VERKOSTOITUMINEN JA KOHDEMARKKINOINTI	35
5.1	Johdanto	35
5.2	Metsäretket	35
5.3	Kohdemarkkinointi	36
5.4	Uutisointi ja julkaisut.....	37
5.5	Vaikutukset	37
6	PUUSTI-HANKKEEN LOPPUPÄÄTELMÄT.....	39
6.1	Hankkeella saavutettiin.....	39
6.2	Suosituksat jatkotoimille	40

LÄHTEET

1 PUUSTI-HANKE

1.1 Hankkeen tausta

Etelä-Savo on Suomen metsäisin maakunta metsäpinta-alan ja metsän kasvulla mitattuna. Alue on Suomen tärkein puumarkkina-alue n.10 % osuudella. Puun tarjonta Etelä-Savon metsistä on kasvanut viime vuosina ja se haastaa metsätalouden kestävyttä ja energiapuun kestävyden määritelmää. Etelä-Savon metsien hakkuumahdollisuudet ovatkin nykyisellä korjuumäärällä ainespuun osalta täyskäytössä. Toisaalta teollisuuden kasvanut puukäyttö ei näy ensiharvennusten toteutuksen pinta-alan kasvuna, ja metsissä on siten runsaasti mahdollisuuksia integroituun aines- ja energiapuun hankintaan.

Aktiivisesta metsänkäytöstä huolimatta maakunnan nuoriin metsiin on kertynyt merkittävä metsäbiomassan korjuureservi, jonka vajaakäyttö uhkaa heikentää tulevaisuuden hyvälaatuisen tukkipuun tuotantopotentiaalia. Lisäkasvun ja tarjonnan takaamiseksi nuoret kasvatusmetsät olisi harvennettava ajallaan. Energiapuun käytöllä on merkitystä päästövähennyksinä korvaamaan uusiutumattomia raaka-aineita. Erityisesti turpeen käytön lopettamiselle tehty periaatepäätös Etelä-Savon Energia Oy:ssä vuoteen 2035 mennessä pitää korvata uusiutuvilla biopolttoaineilla.

Ongelmana on ollut pienpuun korjuun heikko kannattavuus, mikä on vaikuttanut nuoren metsien kunnostuksien konetyön tekemisen kiinnostukseen. Energiapuun saatavuus ensiharvennuksilta voi tulevaisuudessa heikentyä, kun kuitupuut tarvitaan selluteollisuuden jalostukseen. Etelä-Savon alueen lämpö- ja voimalaitosten metsähakkeen käyttö on 2010-luvulla vaihdellut vuoden 2012 492 000 kuutiometristä 378 000 kuutiometriin vuonna 2017. Vuonna 2020 käyttö oli 403 000 kuutiometriä. Nuorten metsien energiapuuta käyttömäärästä oli vuonna 2012 yhteensä 279 000 m³ ja vuonna 2017 yhteensä 202 000 m³. Vuonna 2020 käyttö oli 229 000 kuutiometriä. Hakkuutähteen merkitys on kasvanut ja varsinkin nuoren metsän Kembra puun rooli on vähentynyt tukiehtojen muuttumisen jälkeen vuodesta 2015.

Metsätalouden kestävyden, puuston kasvun ja hiilensidonnan kannalta metsänhoidollisesti myöhästyneiden ensiharvennusten ja nuoren metsän kunnostusten määrää olisi moninkertaistettava nykyisestä.

Nuorten metsien puunhankinnan ja korjuun kannattavuutta voidaan parantaa hankkeen toimenpiteillä:

- Hyödyntämällä laserkeilauksen digitaalisia menetelmiä nuoren metsän kunnostuksen kohteiden tarkempaan kartoitukseen.
- Tarkastelemalla mahdollisia nuoren metsän energiapuun korjuun kustannustehokkuutta parantavia uutta korjuumenetelmää ja -teknologiaa
- Edistämällä koneyrittäjäverkostojen yhteistyötä kustannustehokkaiden toimintamallien käyttöön ottamiseksi puuraaka-aineen hankinnan arvoketjussa yhteistyössä loppukäyttäjien kanssa
- Aktivoimalla metsänomistajien ensiharvennus ja nuoren metsän kunnostuskohteiden korjuurästien toteuttamista ja seuraamalla kohdemarkkinoinnin toimivuutta eri asiakassegmenteissä.

1.2 Hankkeen tavoitteet ja kohderyhmä

Hankkeen tavoitteena on edistää puun tarjonnan alueellista kestävyyttä ja nuorten metsien käsittelyiden kannattavuuden parantumista tarkemmalla metsikkö- ja konekohdevalinnalla, jota tuetaan uusien vaihtoehtoisten korjuumenetelmien demonstroinnilla, korjuusimuloinnilla sekä metsänomistajien aktivoinnilla ja koneyrittäjien verkostoitumisella. Puun hankintaketjuun kytkeytyvien koneyrittäjien yhteistyötä ja käytännön toimintamalleja kehittämällä sekä tutkimuksessa syntyneen tiedon konkreettisella käyttöönotolla vaikutetaan raaka-aineen hankinnan kustannustehokkuuteen, toimitusvarmuuteen ja laadun hallintaan.

Tarkennetaan ja havainnollistetaan metsäbiomassan alueelliset tarjontapotentiaalit ajantasaisen metsävaratiedon pohjalta huomioiden lisääntyvien ainespuun hakkuiden ja metsäenergian käytön kasvun tuomat vaikutukset. Tavoitteena on tuottaa tarkempaa tietoa ja luokitella nuoren metsän kunnostuksen kohteet nykyisille ja uusille korjuukalustoille sekä alueellisille kysyntäkohteille hyödyntäen laserkeilausmenetelmää. Hankkeen tavoitteena on demonstroida ja simuloida käytäväharvennuksen menetelmää Etelä-Savon nuorissa metsissä ja jalkauttaa työmenetelmää käytännön toimintaan.

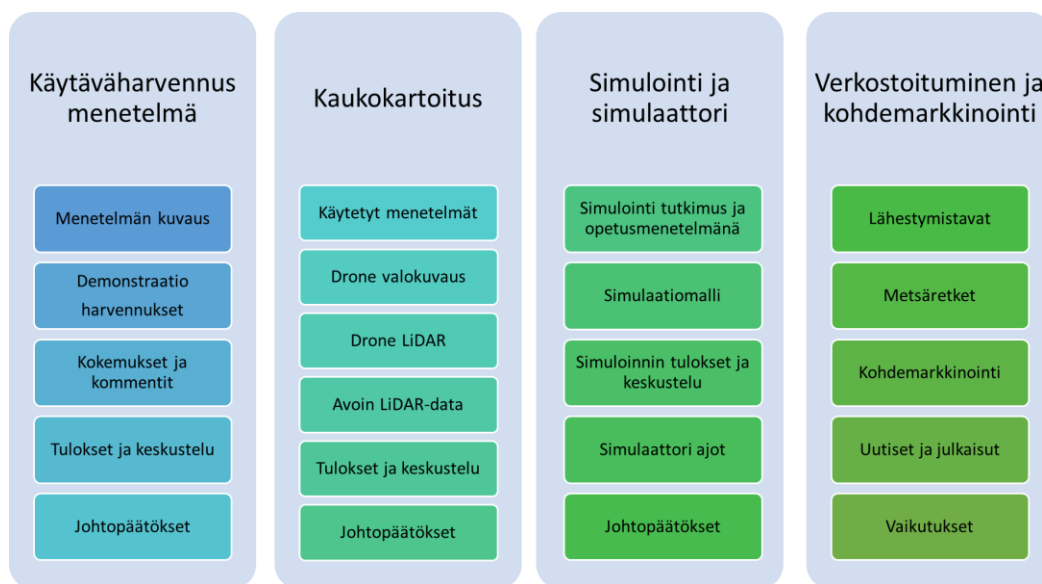
1.3 Hankkeen toteutus

PUUSTI-hankkeen toteutus oli jaettu neljään osatehtävä:

1. Etelä-Savon metsikkö- ja konekohtainen malli
 - 1.1. Metsien laserkeilausaineiston kohdekäsittely
 - 1.2. Konekohtainen mallinnus
2. Koneyrittäjien verkostoituminen ja metsänomistajien kohdemarkkinointi
 - 2.1. Verkostoitumisen työpajat
 - 2.2. Kohdemarkkinointi
 - 2.3. Loppukäyttäjien tarpeet
3. Uusien menetelmien testaus ja käyttöönotto
 - 3.1. Käytäväharvennuksen toteutus
 - 3.2. Nuoren metsän paikalliskohteiden laserkeilaus lennokilla
 - 3.3. Käytännön korjuuohjeet
4. Hankkeen koordinointi ja tulosten raportointi

1.4 Tutkimusraportin rakenne

Tämä tutkimusraportti on “PUUSTI – Puun tarjonnan kestävä edistäminen digitalisoinnin ja verkostoitumisen keinoin” –hankkeen loppujulkaisu, jonka on koostanut LUT-yliopiston Bioenergian laboratorion tutkimusryhmä yhteistyössä Metsäkeskuksen ja Esedun kanssa. Tutkimusraportissa käsiteltiin PUUSTI-hankkeen toimia neljänä omana artikkelina ja loppupäätelmänä hankkeen toimista. Artikkelit ja näiden ala-artikkelit on esitelty Kuva 1. Tutkimusraportin kirjoittajana toimii tutkushenkilöt.



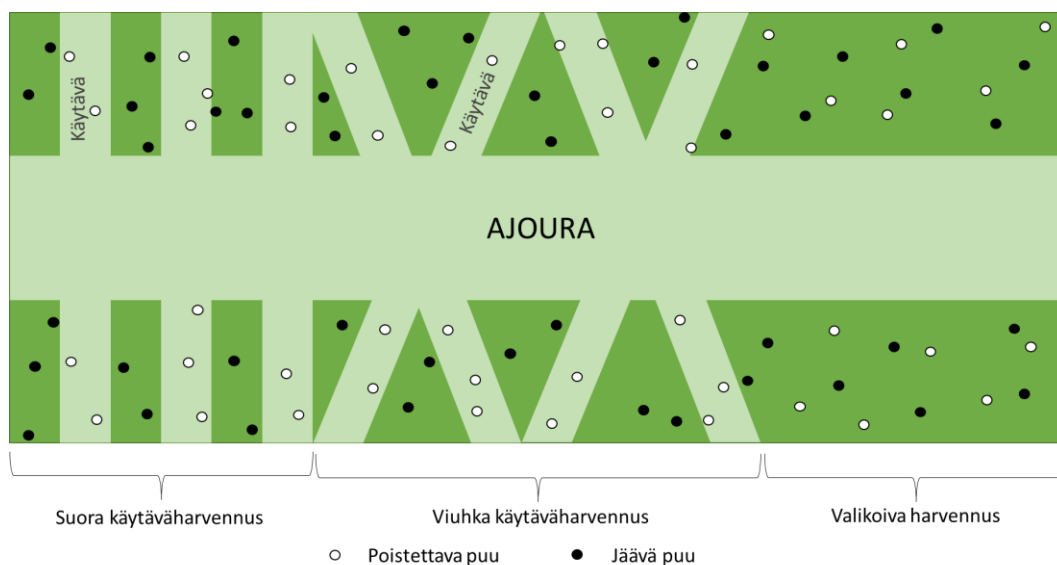
Kuva 1. Raportin artikkelit ja ala-artikkelit.

Hankkeessa tuotettiin myös diplomi-insinöörin lopputyötä LUT-yliopiston opiskelijalle. Opiskelija Juho Haapalainen tutki koneoppimisen hyödyntämistä harvesterin tuottavuuden arvioinnissa ”Forest machinery productivity study with data mining” -työssään (Haapalainen, 2020). Työssä hyödynnettiin Ponsse Oy:n Scorpion harvesteriin asennettua Singal Loggeria ja tiedonlouhinta menetelmiä tuottavuuteen vaikuttavien tekijöiden löytämiseksi. Työssä löydettiin 7 merkittävää tekijää tuottavuudelle, joista tärkeimmäksi osoittautui puun rungon paksuus.

2 KÄYTÄVÄHARVENNUS MENETELMÄ

2.1 Menetelmän kuvaus

Käytäväharvennus, toiselta nimeltään väyläharvennus, on geometrinen harvennus menetelmä. Perinteisestä poiminta harvennuksesta poiketen, harvennettavat puuta ei valita, vaan kaikki puut poistetaan 1–3 m levyiseltä käytävältä ja kaikki puut jätetään harventamatta harvennettujen käytävien välillä. Havainnekuva kahdesta käytäväharvennus tyypistä ja poiminta harvennuksesta on esitetty Kuva 2:ssa.



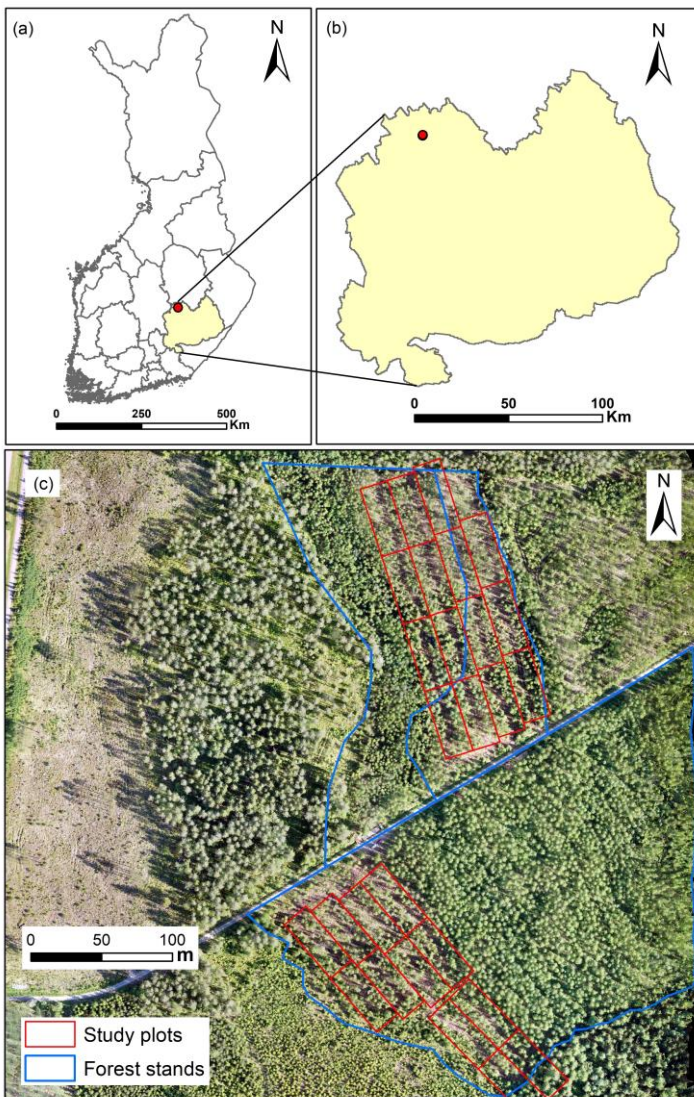
Kuva 2. Poiminta ja käytäväharvennuksen havaintokuva (Bergström, 2019).

Aikaisemmat tutkimukset käytäväharvennus menetelmästä ovat osoittaneet mahdollisen tuottavuuden kasvun. Käytännön harvennus kokeissa on saavutettu 16 % tuottavuuden kasvu (Bergström et al., 2010) ja simulointi tuloksissa jopa 44 % tuottavuuden kasvu (Bergström et al., 2007).

Käytäväharvennuksen korjuu jälki eroaa merkittävästi perinteisestä poiminta harvennuksesta. Käytävät näkyvät selkeästi ja käytävien väleillä puusto on koskematon. Jäävä puusto on monipuolisempaa, kuin perinteisen poiminta harvennus menetelmällä (Nuutinen et al., 2021). Puuston lajisekoitus pysyy saman tyyppisenä, kuin ennen harvennusta ja käytävien väliin jää luonnollisesti tiheikköjä ja eri ikäisiä puita.

2.2 Demonstraatio harvennukset

Hankkeen yhteydessä toteutettiin kaksi demonstraatio hakkuuta. Ensimmäinen demonstraatio hakkuu suoritettiin Pieksämäellä. Tämän demonstraation yhteydessä suoritettiin kaukokartoitusta Arbonaut Oy:n toimesta lennokilla ja Ponssen Scorpion hakkuukoneen toimintaa mitattiin ”Singal Logger” laitteistolla. Hakkuu palsalta valittiin 27 testialuetta (Kuva 3), joissa suoritettiin harvennus kolmella eri tyyllillä. Testialueitten pituus oli 50 metriä ja leveys 20 metriä.



Kuva 3. Pieksämäen demonstraatio palstat ja testialueet (a) Demonstraatio palstat Suomen kartalla ja (b) Etelä-Savon maakunnan kartalla. (c) Ilmakuva demonstraatio alueesta ja valitut testialueet harvennuksen jälkeen kesäkuussa 2020.

Demonstraatiopalstojen kokonaisalat koostuivat kolmesta eri palstasta, joiden puustotiedot ennen harvennuksia on esitelty Taulukko 1. Osalle alueesta oli suoritettu ennakko raivaus, mutta myös raivaamatonta aluetta oli koealueitten sisällä.

Taulukko 1. Pieksämäen demonstraatio palstan puusto tiedot.

Palsta	Pinta- ala [ha]	Ikä [Vuotta]	Tiheys [Runkoa/ha]	Rinnanympä- rysmitta [cm]	Pää puulaji
1	6	27	1673	13,7	Rauduskoivu
2	1	22	4869	9,4	Lehtikuusi
3	2	28	5078	11,3	Mänty

Hakkuukoneeseen kytketty Singal Logger tallensi koneesta mitattuja tietoja ja hakkuukoneen sijainnin GPS pisteinä 0,02 sekunnin tarkkuudella. Nämä tiedot tallennettiin CSV-tiedostoihin ja tiedostojen avulla suoritettiin analyysi hakkuusta. Singal logger tiedostot analysoitiin Python ohjelmointikielen avulla ja tiedostoista selvitettiin eri hakkuu vaiheiden osuudet. Selvitetyt vaiheet ja tarkempi kuvaus näistä on esitetty Taulukko 2

Hakkuut suorittivat Esedun metsäpuolen opettajat. Heille oli etukäteen esitelty käytäväharvennus tekniikkaa, mutta he toteuttivat kyseistä harvennus menetelmää ensimmäistä kertaa. Heitä oli ohjeistettu tekemään kolmea eri harvennus tapaa, 90 asteen käytäväharvennus (käytävät poikkisuorassa), 45 asteen käytäväharvennus (viuhka kuvio) ja perinteistä poiminta harvennusta. Ohjeistuksena oli tehdä 50 metriä yhtä harvennus tapaa ja tämän jälkeen vaihtaa toiseen harvennus tapaan.

Taulukko 2. Singal loggerista selvitettyt hakkuukoneen työvaiheet

Vaihe	Kuvaus	Data analyysi
Hakkuukone sammutettu	Hakkuukoneen moottori ei ole käynnissä	RPM = 0
Ajaminen	Hakkuukone liikkuu tai on valmistautumassa liikku- maan	Ajonopeus > 0 tai Työjarru pois päältä ja ei muuta liikettä
Paikoillaan	Hakkuukone ja Hakkuu- koneen koura ei liiku.	Koura ei liiku, Hakkuu- kone ei liiku, Saha- laippa ei liiku, puu ei liiku.
Koura liikkuu ilman puuta	Hakkuukoneen koura liik- kuu ilman lastia	Koura tyhjä ja liikkuu
Koura liikuttaa puuta	Hakkuukoneen koura liik- kuu puun kanssa.	Kourassa puu ja liikkuu
Puun työstö	Hakkuukone katkaisee tai liikuttaa puuta kourassa	Kourassa puu liikkuu tai sahalaippa liikkuu

Väyläharvennuksen demonstraatiohakkuu Mikkelin kaupungin energiapuuleimi-
kolla tehtiin syyskuulla 2021. Mikkelin kaupunki tarjosi nuoren metsän harvennus-
kohteen menetelmän pilotointia varten. Tavoitteena oli saada käytännön kokemusta
kohdevalinnasta ja väyläharvennuksen työmenetelmästä ensiharvennuksen ja nuo-
ren metsän hoidon toteutuksessa. Demonstraatiohakkuu tehtiin Kasiforest Oy:n toi-
mesta Ponssen Fox harvesterilla (Kuva 4) ja hakkuusta saatiin kokemusta väylähar-
vennuksen työmenetelmästä ensiharvennuksen ja nuoren metsän kunnostuksen me-
netelmänä, jossa hakkuu tehdään ilman aluspuuston ennakkoraivausta.



Kuva 4. Mikkelin demonstraatiohakkuuta suorittamassa oleva Ponsse Fox harvesteri.

Testileimikko koostui kahdesta ensiharvennuskuviosta, joiden pinta-alat olivat 0,7 ha ja 1,3 ha. Puustoltaan 0,7 ha:n hakkuukuvio oli kooltaan pienempää, puuston keskiläpimitta ennen hakkuuta oli 9,2 cm ja keskikorkeus oli 10,2 m. Hakkuun jälkeen keskiläpimitta oli pienentynyt 8,2 cm. Puustosta männyn osuus 60 % ja koivun osuus 40 %. Puustoltaan 1,3 ha:n hakkuukuvio oli kooltaan suurempaa, puuston keskiläpimitta ennen hakkuuta 13,2 cm ja keskikorkeus oli 12,5 m. Hakkuun jälkeen keskiläpimitta oli kasvanut 15,6 cm. Puustosta männyn osuus 80 %, kuusen osuus 10 % ja koivun osuus 10 %. Ennen hakkuuta tehdyn kenttämittauksen mukaan puuston tiheys pienemmällä kuviolla oli 4800 kpl/ha ja suuremmalla kuviolla 3200 kpl/ha. Hakkuun jälkeen tehdyn korjuutyön laatutarkastuksen mukaan puuston tiheys pienemmällä kuviolla 2150 kpl/ha ja suuremmalla kuviolla 1380 kpl/ha. Korjuutyön laatu molemmilla hakkuukuvioilla oli hyvä ja korjuuvaurioita 0 % molemmilla demonstraatiohakkuukuvioilla.

Taulukko 3. Testileimikkojen tiedot ennen harvennusta.

Palsta	Pinta-ala [ha]	Ikä [Vuotta]	Tiheys [Runkoa/ha]	Rinnanympärysmitta [cm]	Pää puulaji
1	0,7	20	4800	9,2	Mänty
2	1,3	24	3200	13,2	Mänty

Käytäväverkosto demonstraatiohakkuukuvioille suunniteltiin ennen hakkuuta määrittämällä hakkuukäytävien välinen etäisyys ja hakkuukäytävän leveys lähtöpuuston perusteella tavoitteena harvennusmallien mukainen jäävä puusto. Käytäväharvennus tehtiin systemaattisena harvennuksena viiden metrin käytävävälillä hakkuukäytävän leveyden ollessa 2–3 metriä.

2.3 Kokemukset ja kommentit

Lennokkikuvaukset suoritti Arbonaut Oy. Kuvaukset onnistuivat kaiken kaikkiaan hyvin ja materiaali saatiin kerättyä ilman ongelmia. Kustannuksilta LiDAR kuvaus oli merkittävästi kalliimpi laitteiston suuremman arvon takia. Kuvauksien suorittamista ja tuloksia käydään tarkemmin läpi kappaleessa 3. Kaukokartoitus.



Kuva 5. Kuvauskopteri lähdössä kuvauksiin.

Singal Loggerin keräsi merkittävän määrän tietoa, jopa liian paljon. Kerätyn datan käsittelyä hidasti suuret tiedostokoot. Tiedostojen kokoa voisi pienentää kasvattamalla näytteenotto väliä. Tarkkuutena 0,02 sekuntia on hyvin tarkka ja hankkeen tarkoituksiin tämä oli aivan liian tarkka. Tiedostojen analysointiin käytettiin Python ohjelmointikieltä, joka osoittautui tarpeeksi tehokkaaksi käsittelemään tiedostoja.

Käytäväharvennuksen testihakkuiden toteuttaneilla hakkuukoneen kuljettajilla ei ollut aiempaa kokemusta käytäväharvennuksesta. Pieksämäen demonstraatiohakkuiden konekuljettajat totesi käytäväharvennuksen sopivan tiheisiin harvennuskoh-teisiin, joissa kerätään energia- ja ainespuu samalla kertaa. Suoran käytävän mal-lissa he totesivat mahdollisen vaaratilanteen, jossa joudutaan syöttämään puuta suo-raan konetta kohti. Jos kouran pituusanturi ei saa oikeaa lukemaa, voi koura syöttää puun koneeseen. Tämä on erittäin vaarallista, jos puu osoittaa ohjaamoon ja kuljet-tajat suosittelevatkin syöttämistä maanpinnan lähellä, jolloin puun törmäys kohdis-tuisi renkaisiin tai maahan.

Mikkelin demonstraatiohakkuu kohteen suorittanut korjuuyrittäjä totesi demonst-raatiohakkuun jälkeen, että väyläharvennus nopeuttaa hakkuuta, kun kohdevalinta on menetelmälle oikea. Kohdevalinta nähtiin tärkeäksi myös, kun tarkastelussa ovat väyläharvennuksen metsänhoidolliset vaikutukset jäävän puuston laatuun, kasvuun ja järeytymiseen. Käytäväharvennuksessa on rajalliset mahdollisuudet vaikuttaa jäävän puuston laatuun ja tilajärjestykseen. Jos puusto on ryhmittäistä käytävähar-vennuksessa jää helposti harventamattomia puuryhmiä, jotka valikoivassa harven-nuksessa harvennettaisiin.

Hakkuukäytävien sijoittamisessa puuston ryhmittäisyyttä voidaan ottaa huomioon. Myös hybridimenetelmää on käytännön työmailla mahdollista soveltaa. Hybridi-menetelmässä hakataan hakkuukäytävät ja jäävän puuston laatua voidaan ottaa huo-mioon harventamalla puuryhmiä ja poistamalla heikkolaatuisia puita hakkuukäytä-vien väliltä.

Käytäväharvennuksessa hakkuukäytävien välistä puustoa ei käsitellä ja metsän ra-kenne ja puuston tila säilyy samanlaisena kuin ennen hakkuuta. Käytäväharven-nettu metsä on luonnontilaisemman kaltainen ja puulajisekoitus, puuston vaihtelevuus ja peitteisyys säilyy hakkuumenetelmässä. Menetelmän jälki poikkeaa merkit-tävästi perinteisestä poiminta harvennuksesta (Kuva 6).



Kuva 6. Käytäväharvennuksessa käytävältä poistetaan kaikki puusto ja käytävien väliin jätetään kaikki puut. Harvennus jälki poikkeaa merkittävästi poiminta harvennuksesta.

Kohdevalinnalla nähtiin olevan ratkaiseva merkitys menetelmän yleistymisen kannalta. Demonstraatiohakkuusta jäi mielenkiinto jatkaa väyläharvennusmenetelmän testaamista puustoltaan ja korjuuolosuhteiltaan vaihtelevilla kohteilla. Väyläharvennus voi menetelmänä yleistyä ylitiheiden, puustoltaan tasaisten, pienirunkoisten ensiharvennusmetsien käsittelyssä, missä perinteinen valikoiva harvennus ei ole kannattavaa ja korjuuta haittaa runsas alikasvos.

Väyläharvennuksen tuottavuus riippuu kohteen ominaisuuksista. Tarkempia suosituksia kohdevalintakriteereistä ei demonstraatiohakkuun perusteella voida vielä antaa. Väyläharvennuksen kohdevalintaa ja kriteerejä määriteltäessä joudutaan hakemaan kompromissi hakkuun tuottavuuden, korjuukustannusten ja jäävän puuston optimaalisen kasvun ja järeytymisen kesken.

2.4 Tulokset ja keskustelu

Singal Loggerin toiminta oli mittauksien ajan epävarmaa ja osa koepalstoista jäi kokonaan tallentamatta. Tämän lisäksi kerättyä tietoa oli merkittävämmää ja

tulosten analysointi oli hankalaa. Tämän lisäksi demonstraatio hakkuissa on havaittavissa merkittäviä vaihteluja eri harvennusvaiheen osuuksissa. Tämä on käytännössä tapahtuva asia, kun esimerkiksi kesken töiden joutuu vastailemaan puheliimeen tai joutuu maastossa tarkistamassa esteitä. Uuden menetelmän kanssa nämä häiritsevät tutkimuksen tekemistä, kun pyritään löytämään menetelmän vahvuudet ja heikkoudet. Hankkeessa pyrittiin tuomaan menetelmää käyttöön metsäalan toimijoille, jolloin nämä tekijät ovat huomioitava. Valitettavasti nämä häiriötekijät korostuvat uuden menetelmän kanssa. Tämä merkitys näkyy selkeästi simulaattoriajosten yhteydessä (Kappale 4.3), kun tuloksia vertaillaan.

Harvennuksen suorittaneet konekuskit pitivät menetelmää erilaisena ja kaikki toteivat taistelevan vaistoaan vastaan harvennuksen aikana. Käytävän ulkopuolella oleva puu, joka perinteisen ohjeen mukaan pitäisi kaataa, jäi nyt kaatamatta ja hyviä kasvupuita kaadettiin. Yhtenä ongelmana uudessa menetelmässä oli käytävien väliin jäävän matkan arviointi. Haukivuoren hakkuun tekijät käyttivät koneen aksleita tämän matkan arviointiin ja arveltiin matkan arvioinnin helpottuvan kokemuksen myötä.

Harvennuspalstoilla kävi metsäalan toimijoita ja metsän omistajia. Yhteisenä mielipiteenä oli harvennuksen jäljen olevan erilaista. Monimuotoisuus huomioitiin, mutta eroavaisuus perinteisen harvennuksen jälkeen oli niin merkittävä, etteivät nähneet menetelmää hyvänä. Keskusteluissa tuli esille, että harvennusjälki olisi metsästäjille ja jatkuvan kasvatukseen pyrkiville mieleinen.

Tässä on hyvä huomioida, että molemmat palstat olivat hyvin hoidettuja nuoria metsiä ja Pieksämäen palstat olivat hieman varttuneita käytäväharvennukselle. Molemmissa tapauksissa konekuljettajat olivat kokeneita kuljettajia, mutta suorittavat käytäväharvennusta ensimmäistä kertaa.

Haukivuorella harvennuksen jälkeinen raivaus olisi merkittävästi parantanut harvennuksen jälkeä. Hakkuun suorittaneen konekuskin mielipide oli, että ennakkoraivaus kannattaisi suorittaa. Tällä saavutettaisiin parempi jälki harvennuksen jälkeen ja harvennus olisi nopeampaa.

2.5 Johtopäätökset

Käytäväharvennus menetelmä on uusi menetelmä ja tämä vaatii totuttelua, niin metsänomistajille, kuin harvennuksen suorittajille. Harvennusjälki on erilainen, verrattuna perinteiseen poiminta harvennukseseen, mutta tämä ei välttämättä ole huono asia. Metsä on harvennuksen jälkeen monimuotoisempaa ja käytävien välille jää luonnollisesti riistatiheikköjä. Molemmissa demonstraatiohakkuiden tapauksessa poistuma oli toivottua pienempi, mikä kertoo käytäväharvennuksen suunnittelun hankaluudesta. Vaikka menetelmä itsessään on systemaattinen, niin käytävien ja harventamatta jäävän alueen leveys on tärkeä valita kohteelle sopivaksi. Tässä hakkuukoneen kuljettaja on tärkeässä roolissa ja käytävien välien mitoitus voi olla silmämääräisesti hankalaa. Haukivuoren demonstraatio hakkuun yhteydessä, kone kuljettaja käytti hakkurin pyöriä merkkeinä, jolloin käytettävän koneen merkitys käytäväharvennuksen geometriaa kasvaa.

3 KAUKOKARTOITUS

3.1 Käytetyt menetelmät

Kaukokartoitusta suomen metsissä on käytetty paljon ja Metsäkeskus tarjoaa avoimena datana metsävaratietoja. Kaukokartoituksen luotettavuus on hyvä varttuneessa metsässä, mutta nuoressa metsässä, jossa puusto on pienempää, tarkkuus kärsii.

Hankkeessa tarkasteltiin nuorenmetsän kaukokartoittamista eri keinoin. Varsinkin pienemmän puuston mittaaminen lennokin avulla oli hankkeen tarkastelun kohteena. Lennokki, eli tässä yhteydessä nelikopteri, voidaan varustaa erilaisilla kuvauslaitteilla. Metsävaran mittaamiseen voidaan käyttää perinteistä kameraa tai laserkeilauslaitteisto. Kumpikin tarjoaa omia etuja ja haasteita.

Hankkeessa toteutettiin lennokilla ilmakuvaukset ja laserkeilaus Pieksämäen demonstraatio harvennuksen yhteydessä. Kuvaukset suoritettiin ennen ja jälkeen harvennuksen. Kuvaukset suoritettiin ennen harvennusta 24.4.2020 ja harvennuksen jälkeen ilmakuvaukset toteutettiin 1.6.2020 ja laserkeilaus 29.6.2020. Kuvauksien lisäksi harvennuksen jälkeen suoritettiin yksittäisille puille käsin mittaus, jotta kuvauksista saatuja tuloksia voitiin validoida. Mittaukset suoritettiin 10.6.2021 ja 14.6.2021.

3.2 Ilmakuvaukset lennokilla

Ilmakuvauksessa kerätään digitaalisia valokuvia alueesta ja näiden avulla kartoitetaan 3D ominaisuuskuvia alueesta. Valokuvat ovat 2D muodossa ja kolmas ulottuvuus luodaan limittämällä valokuvat n. 80 % keskenään. Valokuvien päällikkyyden ansiosta voidaan arvioida maaston korkeuseroja ja kuvissa olevien objektien korkeuksista.

Taulukko 4 Taulukko 1 sisältää käytetyn laitteiston ja kuvauksen parametrejä harvennuksen jälkeisissä kuvauksissa.

Taulukko 4. Tutkimuksessa käytetty ilmakuvauksen parametrit ja laitteiston ominaisuudet

Parametri	Kuvaus
Lennokki	GEODRONE X4L drone (Geotrim Oy, Finland)
Kamera	42 MP Sony RX1R II (Sony, Japan)
Lentokorkeus (m)	140
Keskimääräinen lentonopeus (m/s)	7
Kuvien päällekkäisyys pystysuunta (%)	80
Kuvien päällekkäisyys sivusuunta (%)	65
Spatiaalinen resoluutio (cm/pixel)	4
Valokuvan resoluutio (pixels)	7952*5304
Kuvien määrä	812

Kuvauksissa käytetty nelikopteri (Kuva 7) pystyy lentämään 18 m/s tuulessa ja sen arvioitu lentomatka on 2500 m. Ilmakuvaus pystyttiin suorittamaan kohteella yhdellä lennolla. Lentoreitti oli ennakkoon suunniteltu ja lennon aikana lennokkia ei tarvinnut ohjata. Laitteisto mahdollisti lennon seuraamisen maasta käsin ja halutessa lennokkia olisi voinut ohjata, mutta tälle ei ollut tarvetta. Lennokin satelliittipaikannus ja inertiamittaus tallensi lennokin korkeuden, sijainnin ja lennokin asennon jokaiselle valokuvalle. Viisi kontrolli pistettä maastosta valittiin tutkimusalueelta ja nämä paikannettiin reaaliaikaisella kinemaattisella mittauksella (Real Time Kinematic, RTK).



Kuva 7. Kuvauksissa käytetty nelikopteri.

Ilmakuvauksen jälkeen valokuvat käsiteltiin Pix4D (<https://www.pix4d.com/>) sovelluksella, jolla saatiin 2D valokuvista 3D kuvia. Päälekkäiset alueet muunnettiin maastomalliksi Khosravipour et al. (2014) menetelmän avulla. Maastomallista laskettiin yksittäisten puitten korkeudet latvusmallialgoritmin avulla Arbonaut Oy:n toimesta. Ilmakuvauksen avulla ei pysty selvittämään puitten rinnanympärysmittaa, joten tämä määritettiin korkeuden avulla. Rinnanympärysmittan arviointi mallit ovat epälineaarisia ja vaihtelee puulajeittain sekä alueittain. Etelä-Savon alueen eri puulajeille on esitelty alla.

Kuusi ja leveälehtisille:

$$D = a * H^b$$

Missä, D = Puun rinnanympärysmitta

H = Puun korkeus

a = Kerroin (Kuuselle a = 0,972899 ja leveälehtisille a = 0,388052)

b = Kerroin (Kuuselle b = 1,069336 ja leveälehtisille a = 1,304328)

Mänty:

$$D = \left(\frac{H - 1.3}{a} \right)^{\frac{1}{b}}$$

Missä, D = Puun rinnanympärysmitta

H = Puun korkeus

a = Kerroin (Männylle a = 0,578076)

b = Kerroin (Männylle a = 1,091689)

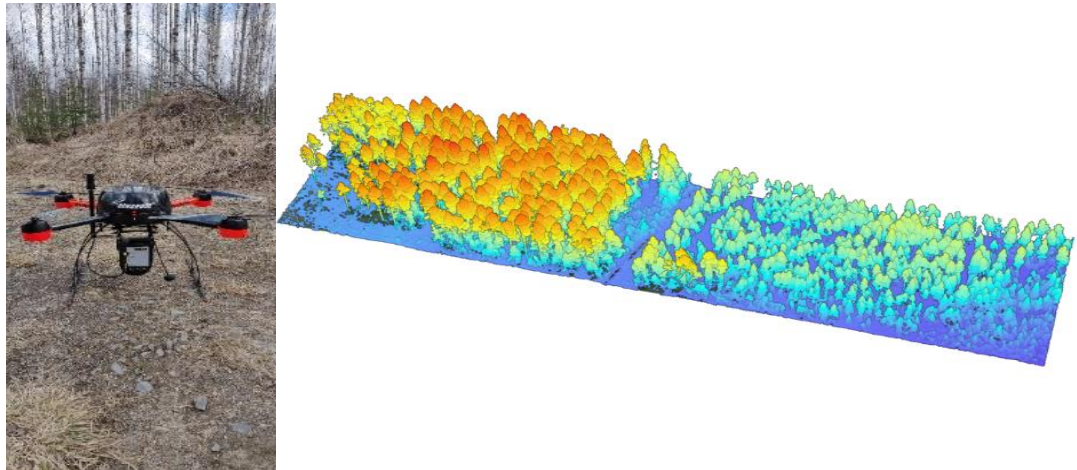
3.3 Laserkeilaus lennokilla

Laserkeilaus menetelmä käyttää radioaaltoja mittaamiseen ja antaa 3D kuvauksen keilattavasta pinnasta ja keilaus voidaan suorittaa myös pimeään aikaan, toisinkuin ilmakuvauks (Nischan et al 2003). Lennokilla suoritettava laserkeilaus sopii testialueen keilaukseen, koska alue ei ole liian suuri. Suurempien alueiden tarkastelussa laserkeilaus voidaan suorittaa lentokoneesta käsin, kuten Metsäkeskuksen avoimen metsävaratietueitten kerääminen on tehty.

Taulukko 5. Tutkimuksessa käytetyn laserkeilauskaluston ominaisuudet ja parametrit

Parameters	Descriptions
Lentokorkeus (m)	60
Keskimääräinen lentonopeus (m/s)	5
Pistetiheys (pistettä/m ²)	78
Pulssi taajuus (kHz)	300
Sensori	YellowScan Surveyor® sensor
Skanneri	Velodyne VLP-16 Puck laser scanner

Laserkeilaus luo valmiiksi 3D kuvauksen alasta (Kuva 8), jolloin kuvia ei tarvitse käsitellä ensiksi 3D maastomalli muotoon. Yksittäisen puustotietueen luonti on saman tyyppinen, kuin ilmakuvauksen maastomallista tehty ja samoja algoritmeja voidaan käyttää näissäkin laskelmissa.



Kuva 8. Laserkeilaus lennokka ja keilauksen tuloskuvaaja.

3.4 Avoin LiDAR-data

Avoin data on kerätty laserkeilauksella, jonka pistetiheys on ollut 5 havaintopistettä neliometrille. Tämä on kuvattu 1,5–2 km korkeudesta. Lisäksi on otettu ilmakuvia 7–8 km korkeudesta maastotarkkuudella 40 cm. Tämä on tarjonnut hyvän tarkkuuden, varsinkin varttuneissa metsissä. Pienemmän puuston mittauksissa luotettavuus kärsii ja laserinventointi ei sovellu lainkaan pienille taimikoille. (Metsäkeskus, 2021).

Avoin metsävaratiedot on esitetty 16x16 metrin ruudukossa ja sisältää alueen keskiarvot puuston pituudelle, halkaisijalle, runkotilavuudelle, pohjapinta-alalle, iälle ja runkoluvulle (Maltamo et al. 2011). Aineisto päivitetään 6–10 vuoden välein.

Avoin metsävaratiedot ei sisällä yksittäisen puun tietoja. Jotta puitten tiedot saataisiin, jouduttiin käyttää eri menetelmää, kuin ilmakuvauksen tai laserkeilauksen yhteydessä. Ensiksi keskiarvoista palautettiin parametrit käyttämällä Weibull-jakaumaa halkaisijoille. Tämän jälkeen jakauma jyvitetiin yksittäisille puille jakaumasta. Tämä menetelmä on tarkemmin kuvattu Mehtätalo et al. (2007) ja Siipilehto et al. (2016) toimesta. Viimeiseksi puut sijainti arvioitiin jokaiselle puulle yhdistämällä laserkeilauksen kuva tuotetulle puulistaan. Tämä menetelmä on tarkemmin kuvattu Peuhkurinen et al. (2021). Tuotettu puulista sisältää samantyyppisen tietueen, kuin yksittäisen puun analyysi ilmakuvauksen tai laserkeilauksen avulla.

3.5 Kenttämittaukset

Ilmakuvauksen, laserkeilauksen ja avoimen metsävaratietojen tuloksien validoinniksi suoritettiin kenttämittauksia. Mittaukset suoritettiin 10 ja 14.6.2021 eli noin vuosi lennökkikuvauksien jälkeen ja puiden kasvu tarvitsee huomioida tuloksissa. Yhteensä 130 puuta mitattiin systemaattisella näytteenotolla. Mitattavat arvot olivat puun korkeus ja rinnankorkeushalkaisija. Puun korkeus määritettiin Suunto PM5/1520 optinen hypsometri ja halkaisijan mittaamiseen käytettiin kaulainta. Kaikilla palstoilla pääpuulajina oli Mänty (*Pinus sylvestris*), Kuusi (*Picea abies*), Koivu (*Betula pendula*) and Haapa (*Populus tremula*).



Kuva 9. Kenttämittaukset Pieksämäen palstoilla.

3.6 Biomassan ja tilavuuden laskeminen

Maanpäällisen biomassan ja rungontilavuuden arviointiin käytettiin Zianis et al. (2005) yhtälöitä:

Mänty:

Maanpäällinen biomassa (Kg)

Yhtälö	a	b	c
$a+b*D+c*D^2$	18.779	-4.328	0.506

Missä, D on DBH (cm)

Rungon tilavuus (dm³)

Yhtälö	a	b	c
$a \cdot D^b \cdot H^c$	0.0942	1.9671	0.7005

Missä, D on DBH (cm) ja H (m) on puun korkeus.

Kuusi

Maanpäällinen biomassa (Kg)

Yhtälö	a	b	c
$a + b \cdot D^2 + c \cdot (D^2 \cdot H)$	0.257	0.187	0.010

Missä, D on DBH (cm) ja H (m) on puun korkeus.

Rungon tilavuus (dm³)

Formula	a	b	c
$a \cdot D^b \cdot H^c$	0.10838	1.8202	0.77154

Missä, D on DBH (cm) ja H (m) on puun korkeus.

Koivu ja haapa:

Maanpäällinen biomassa (Kg)

Formula	a	b
$a \cdot D^b$	0.00087	2.28639

Missä D on DBH (mm)

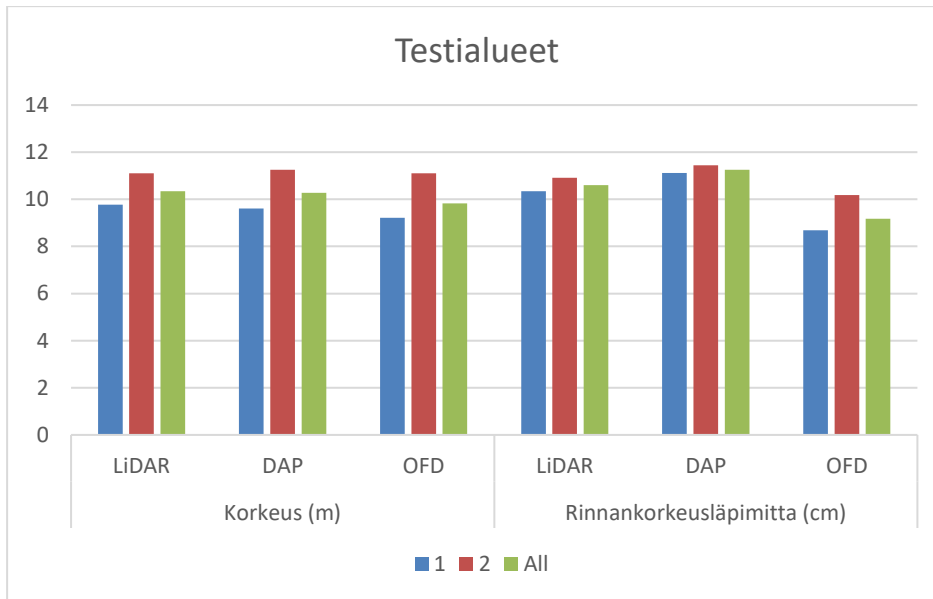
Rungon tilavuus (dm³)

Formula	a	b	c	d	e
$a \cdot (D^b) \cdot (c^D) \cdot (H^d) \cdot (H - 1.3)^e$	0.011197	2.10253	0.986	3.98519	-2.65900

Missä, D on DBH (cm) ja H (m) on puun korkeus.

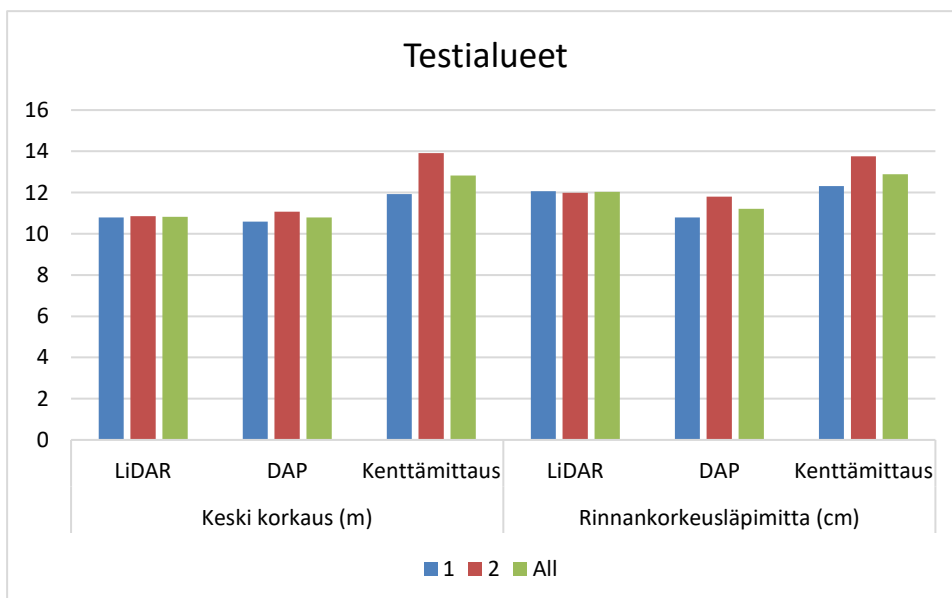
3.7 Tulokset ja keskustelu

Puuston korkeuden arviointi tehtiin hankkeessa kolmella eri tavalla. Korkeuden avulla pystyttiin arvioimaan puuston rinnankorkeusläpimitta. Tarkastellessa tuloksia testialueilta ennen harvennuksia, huomataan arvojen olevan lähekkäin toisiaan (Kuva 10).



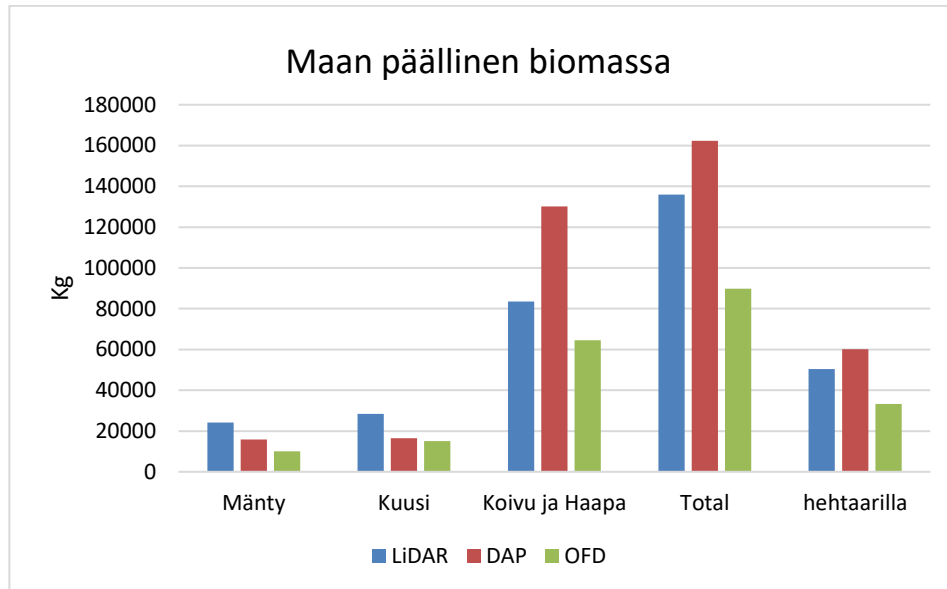
Kuva 10. Puuston keskipuolustus ja rinnankorkeudenläpimitta eri kaukokartoitus menetelmillä ennen harvennusta. LiDAR = laserkeilaus, DAP = ilmakeilaus, OFD = Avoin metsävaratieto

Harvennuksen jälkeen suoritettu kenttämittaus näyttää selkeästi suurempia arvoja, mutta tämä on odotettua, kun mittaukset tehtiin vuosi kaukokartoituksen jälkeen. Harvennuksen jälkeinen tila ei ole enää arvioitavissa avoimella metsävaratiedoilla, jos harvennuksen vaikutusta ei huomioida tuloksissa.

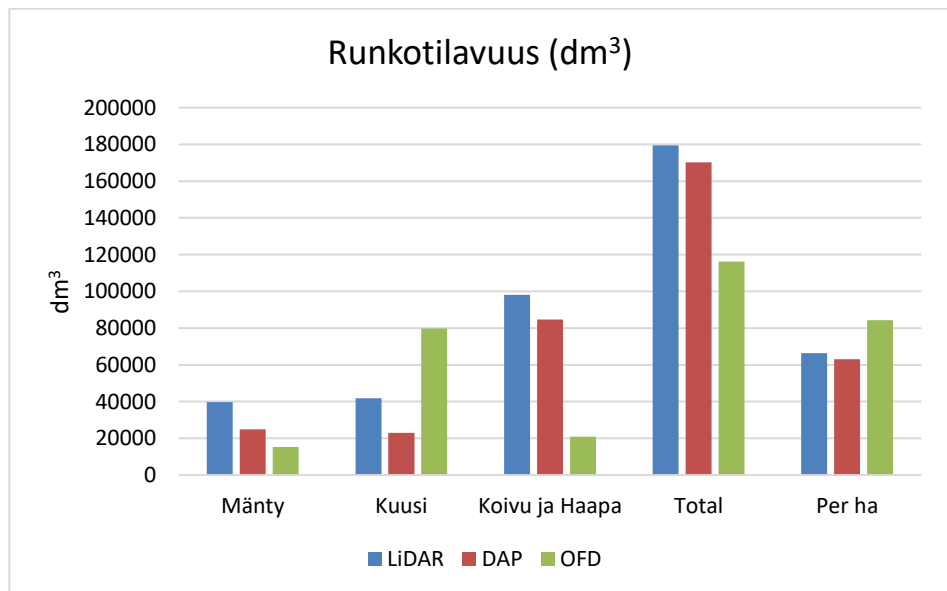


Kuva 11. Puuston keskipuolustus ja rinnankorkeudenläpimitta eri kaukokartoitus menetelmillä harvennuksen jälkeen. LiDAR = laserkeilaus, DAP = ilmakeilaus.

Maanpäällinen biomassan ja runkotilavuuksien tuloksissa on huomattavissa eroavaisuuksia. Tulokset ovat esitetty 2,7 hehtaarille ja per hehtaari.



Kuva 12. Maanpäällinen biomassan tulokset. LiDAR = laserkeilaus, DAP = ilmakuvaus, OFD = Avoin metsävaratieto



Kuva 13. Runkotilavuuden arvioinnin tulokset. LiDAR = laserkeilaus, DAP = ilmakuvaus, OFD = Avoin metsävaratieto

Kaukokartoitusta käytettiin myös arvioimaan harvennuksessa poistunutta biomassan määrää ja tilavuutta (Taulukko 6). Kaikkiaan 1467 puuta harvennettiin. Näiden rinnankorkeusläpimitta oli pienimmillään 4 cm ja suurimmillaan 30 cm. Lyhyin puu oli 3 m ja pisin 25 m pitkä.

Taulukko 6. Korjatun biomassan määrä ja tilavuus. LiDAR = laserkeilaus, DAP = ilmakuvaus, NC= Ei laskettu (Not Calculated)

		Mänty	Kuusi	Koivu ja haapa	Yhteensä	per puu
LiDAR	Biomassa (Kg)	6693	20737	42047	69478	47,36
	Tilavuus (dm ³)	11613	13174	54690	79478	54,18
DAP	Biomassa (Kg)	NC	NC	NC	84283	57,61
	Tilavuus (dm ³)	NC	NC	NC	81256	55,54

Menetelmät ja tulokset on tarkemmin esitelty Gyawali et al. (2021) toimesta.

3.8 Johtopäätökset

Kaukokartoitusmenetelmät pystyvät arvioimaan nuoren metsän puustoa. Menetelmillä ei ole merkittäviä eroja ja menetelmät pystyvät tunnistamaan jopa yksittäisten puitten tiedot. Metsänhoitoa suunnitellessa yksittäisen puun tiedot palstalta ei ole yhtä tärkeä kuin palstan keskimääräiset arvot. Tähän laserkeilaus, ilmakuvaus tai avoin metsävaratieto on riittävä ja kustannuksien kannalta avoin metsävaratieto on halvin. Kumminkin kenttämittauksilla puustotietueen varmentaminen oikeaksi on tärkeää. Mittauksien suorittaminen on hidasta, verrattuna kaukokartoitus menetelmiin, mutta kustannukset ovat vähäiset, kun erikoisia mittalaitteistoja ei välttämättä tarvita mittauksien suorittamisessa.

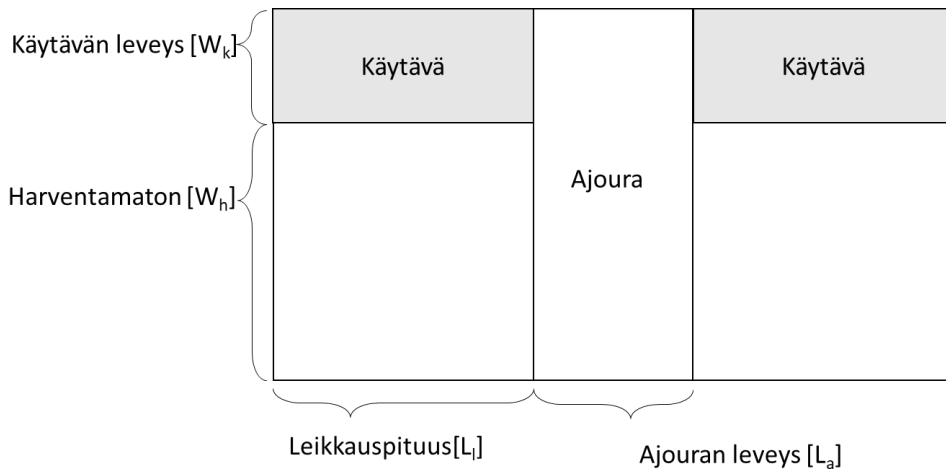
Tutkimus ja opetuskäytössä yksittäisen puun tiedot ovat tärkeämpiä ja kaukokartoitusmenetelmillä voidaan luoda koko palstan puusto tieto hyödynnettäväksi. Puitten todelliset sijainnit simulointimallissa mahdollistaa palstakohtaisen tutkimuksen tekemisen ja opetuskäytössä simulaattorille voidaan viedä todellinen puusto ja opiskelijat voivat toistaa harjoitusta, joka vastaa oikeaa metsää.

4 SIMULOINTI JA SIMULAATTORIAJOT

4.1 Simulointi ja simulaattori

Käytäväharvennus tarjoaa systemaattisuutensa ansioista mahdollisuuden helposti simuloida harvennusta. Hankkeessa kehitettiin agenttipohjainen simulointimalli, jolla pystyttiin tarkastelemaan käytäväharvennusta virtuaalisessa ympäristössä. Simulaatiomalli tarjoaa kustannustehokkaan tavan tuottaa skenaarioanalyysjä ja mahdollistaa tutkimusasetelman toistettavuuden, kuten tarkastelemalla saman palstan harvennuksia eri käytäväharvennus geometrioilla. Simulointimalli tarvitsee todentaa toimivaksi, jotta tulokset ovat luotettavia. Tätä varten voidaan käyttää käytännössä tehtyjä mittauksia, aikaisempia tutkimustuloksia tai analogisia menetelmiä, kuten sopivia yhtälöitä. Hankkeessa simulointimalli todennettiin käyttämällä geometriaa poistuvuuden arviointiin. Simulointimallin tarkempi kuvaus on toteutettu ODD protokollan mukaan (Grimm et al., 2010) ja löytyy liitteistä englanninkielisenä (Liite I)

Simulointimallin toiminnan varmistamiseksi kehitettiin yhtälö, jolla voitiin arvioida poistumaan. Yhtälö kehitettiin pinta-alojen avulla, oletuksella puuston olevan tasaisesti jakautuneen koko palstalle ja käytäväharvennuksien muotojen toistuvan samanlaisina ja olevan suorassa kulmassa ajouraan nähden (Kuva 14).



Kuva 14. Käytäväharvennuksen kuvitus yhtälön kehittämistä varten.

Harvennuksen jälkeisen puuston tiheyden voi laskea pinta-alojen suhteilla ja alkuperäisen puuston tiheyden avulla.

$$Tiheys_{jälkeen} = Tiheys_{ennen} * \frac{Ala_{harventamaton}}{Ala_{palsta}}$$

Lasketaan tarvittavat pinta-alat:

$$A_{harventamaton} = 2 * W_h * L_l$$

$$A_{palsta} = (W_k + W_h) * (2 * L_l + L_a)$$

Sijoitetaan alat yhtälöön:

$$Tiheys_{jälkeen} = Tiheys_{ennen} * \frac{2 * W_{harventamaton} * L_{leikkauspituus}}{(W_{käytävä} + W_{harventamaton}) * (2 * L_{leikkauspituus} + L_{ajoura})}$$

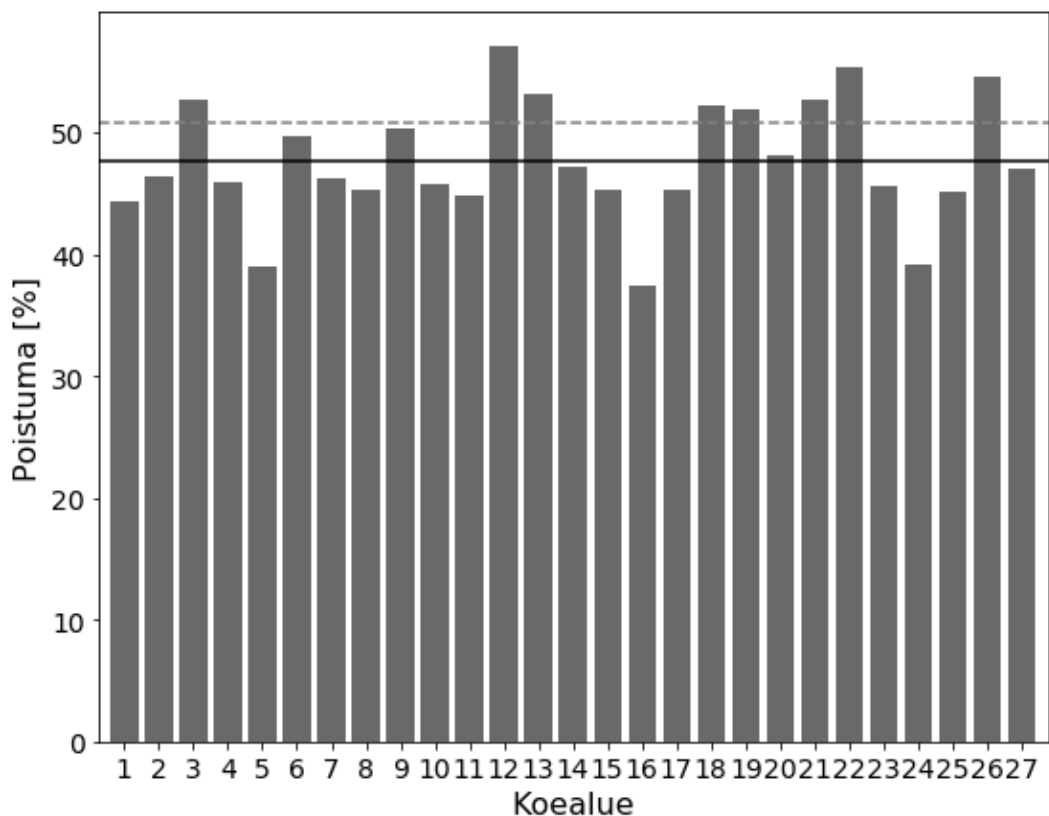
Leikkuupituus ja ajouran leveys saadaan harvennuksessa käytettävästä koneesta. Leikkuupituus on pituus, johon puomi ylettää ja ajouran leveys on koneen leveys lisättyä kuljettajan suosimaa väljyyttä. Käytävän ja harventamattoman alueen leveyksiä suunniteltaessa voidaan käyttää koneen mittoja apuna, esimerkiksi renkaiden väliä. Tällöin harvennusta suorittaessa voi välin helposti mitata koneen avulla.

Hankkeessa toteutettiin myös opetussimulaattorilla käytäväharvennus harvennuksia opiskelija ja opettajien toimesta. Simulaattoriajoilla oli tarkoitus tarkastella mahdollisuutta opettaa uutta harvennus menetelmää virtuaalisessa ympäristössä. Simulaattoriajot tarjosivat myös mahdollisuuden tarkastella käytäväharvennus

menetelmää ja simulaatiomallin toimivuutta. Tätä varten simulaattoriin kytkettiin sama Singal Logger ohjelmisto, joka oli käytössä Pieksämäen demonstraatio hakuilla ja simulaattoriajoista tallennettiin ruutukaappausvideota.

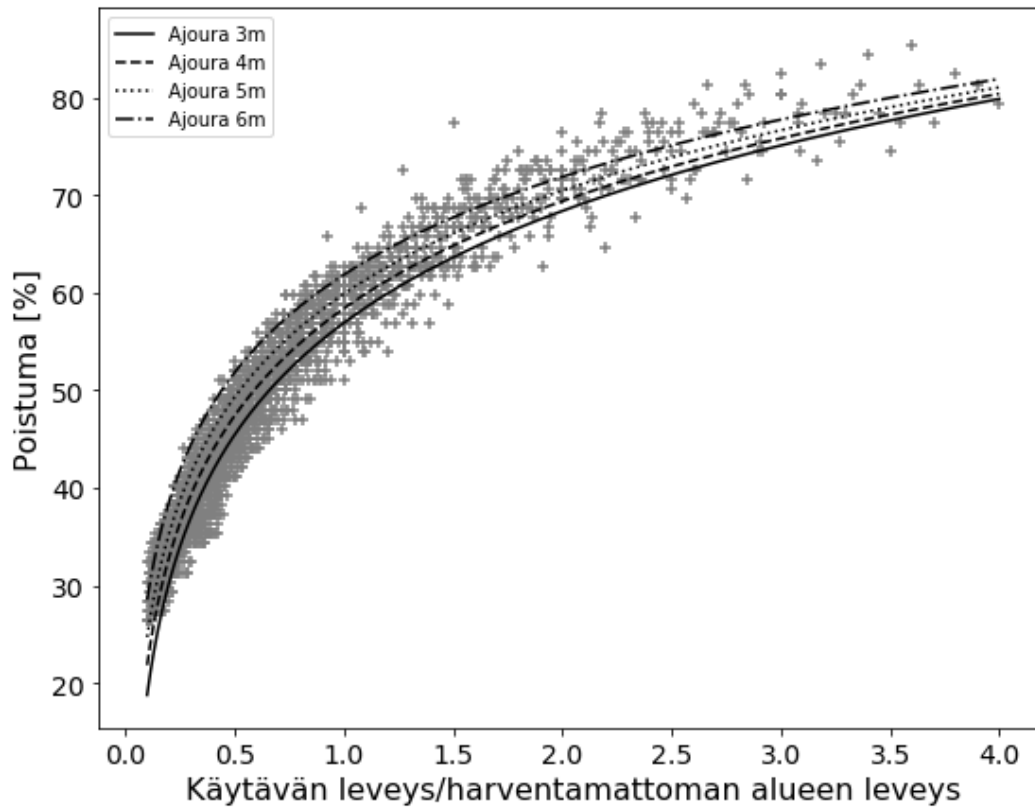
4.2 Simulointimallin tuloksia

Simulointimallin tuloksia vertailtiin yhtälöllä laskettuihin poistumiin sekä aikaisemmissa tutkimuksissa esitettyihin tuloksiin. Tarkastellessa kaikkien palstojen poistumia 1 metrin käytävällä, 1,6 metriä leveällä harventamattomalla alueella ja 4 metriä leveällä ajouralla nähdään vaihtelua (Kuva 15). Tämä vaihtelu on puustosta ja kaikkien simulointituloksien keskiarvo oli 47,7 %. Tämä on vähemmän kuin yhtälöllä arvioitu poistuma (50,8 %), mutta enemmän kuin Ulvcrona et al. (2017) tutkimuksen, jossa vastaavat käytävien dimensiot, 44 % poistuma. Tuloksien perusteella simulointimallin tulokset todettiin tarpeeksi todellisiksi tutkimukseen.



Kuva 15. Simuloinnin tuloksia 1 metrin käytävällä, 1,6 metrin harventamattomalla alueella ja 4 metriä leveällä ajouralla. Musta viiva on simulointimallin tuloksien keskiarvo (47,7 %) ja harmaa katkoviiva yhtälöllä laskettua arvo (50,8 %).

Poistuvuuden arvioinnissa huomattiin merkittävää vaihtelua eri käytävän leveyksillä (Kuva 16). Tämä vaihtelu johtui pienen tutkimusalueen valinnasta simulointimallissa. Harvennettava palsta oli vain 50 metriä, jolloin viimeisen käytävän sijoittautuminen vaikutti merkittävästi tuloksiin.



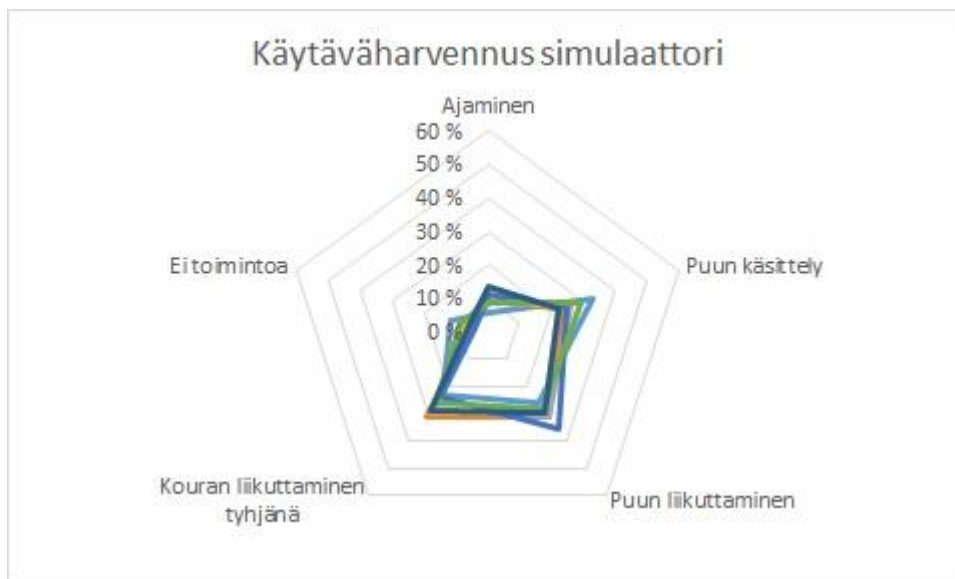
Kuva 16. Käytävän ja harventamattoman alueen suhteen vaikutus poistumaan 4 metriä leveällä ajouralla. Ajourien logaritminen sovitteet merkitty kuvaajaan mustina viivoina.

Tuloksissa voidaan huomata 50–60 % poistuman tavoittamiseksi tarvittavan käytävän ja harventamattoman alueen suhteen olevan 0,5–1,0 välillä. Tämä tarkoittaa 1–3 metrin käytävän tarvitsevan 1–6 metrin harventamattoman alueen.

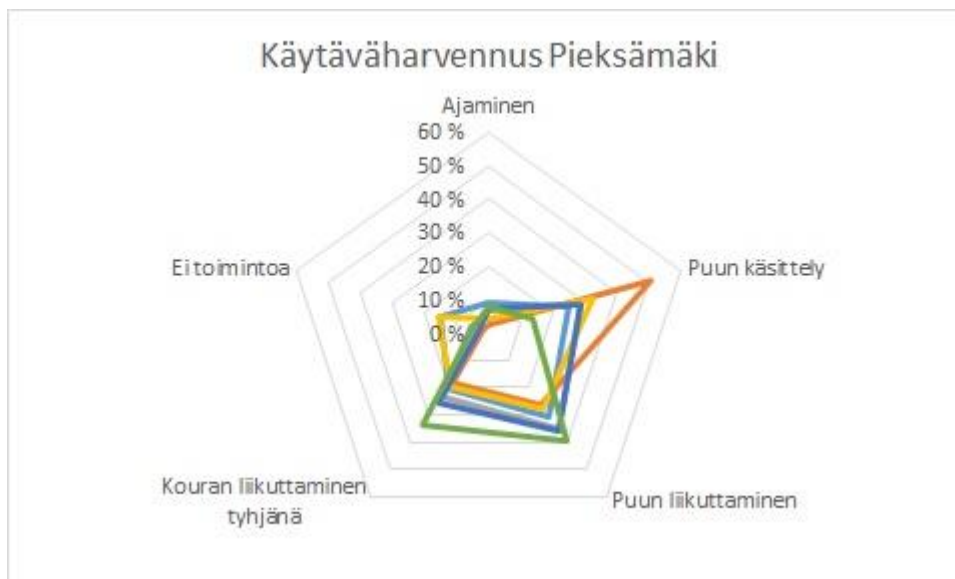
4.3 Simulaattoriajojen merkitys

Merkittävimpanä tekijänä simulaattori ajoissa tuloksissa on toistettavuus. Simulaattoriajojen tulokset ovat samanlaisia eri toistokerroilla, kun käytännön kokeissa on merkittäviä vaihteluja (Kuva 17 ja Kuva 18). Nämä vaihtelut voivat johtua maastosta tai häiriö tekijästä. Simulaattori ajot ovat myös lyhytkestoisia, alle tunnin,

jolloin kuljettajan väsyminen ei näy tuloksissa. Näiden ominaisuuksien vuoksi simulaattorilla tulosten tarkastelussa saadaan menetelmän tuomat etuudet esille.



Kuva 17. Käytäväharvennus toimintavaiheitten aikaosuudet simulaattoriajoissa.



Kuva 18. Käytäväharvennus toimintavaiheitten aikaosuudet Pieksämäen testihakkuissa.

Simulaattorille todellisen hakkuupalstan puustotiedon tuominen mahdollistaa opetuskäytössä harvennuksen harjoittamisen simulaattorilla moneen kertaan, jonka jälkeen opiskelija voi suorittaa kohteen harvennuksen todellisessa ympäristössä.

Tämä mahdollistaa saman kohteella usean toiston tekemisen ja opiskelijalle itsevarmuuden kehittämisen turvallisessa ympäristössä, ennen todellisen koneen ohjaamista todellisessa ympäristössä. Tämä vaatii simulaattorille tuotavan puuston olevan tuore, koska vanha puusto voi poiketa merkittävästi todellisesta. Puuston tuontiin tarvitaan yksittäisen puuston tiedot, jotka voidaan kustannus tehokkaasti kerätä lennokilla ilmakehuvaamalla.

4.4 Johtopäätökset

Simuloinnin perusteella käytävien ja harventamattomien alueiden leveydet on vaikea arvioida ja puuston merkittävä vaikutus poistumaan tekee haasteelliseksi ohjeistaa käytäväharvennuksen dimensiot yleisesti. Käytävien leveydet vaikuttavat korjuujälkeen muutenkin kuin poistuman kannalta, joten jokainen kohde vaatii oman tarkastelun käytäväharvennuksen sopivuuden varmistamiseksi. Poistumaa voidaan arvioida yhtälöllä, joka antaa alustavan muodon käytäväharvennukselle, mutta metsäkoneen ajajan olisi hyvä tarkkailla jäävän puuston määrää silmämääräisesti ja muuttaa käytäväharvennuksen dimensioita tarpeen mukaan.

Simulointimallin tulokset ovat nyt vain verrattavissa eri käytäväharvennuksiin ja hankkeessa tätä käytettiin käytävien dimensioitten tutkimiseen. Tuottavuuden tarkastelu vaatisi simulointimallin kehittämisen poiminta harvennukselle, jolloin voitaisiin vertailla käytävä ja poimintaharvennus menetelmien eroja keskenään. Saman tyyppinen vertailu tutkimus voitaisiin suorittaa simulaattorilla ja tämän tuloksia voitaisiin käyttää simulointimallin validoinnissa.

Simulaattori on erittäin hyödyllinen opetuskäytössä, mutta myös tutkimuksessa. Opetuskäytössä mahdollisimman todenmukainen ympäristö on etuna ja tähän kaukokartoitetun metsän tuominen opetusympäristöksi on hyödyllinen. Toisin kuin oikeassa metsässä, simulaattori mahdollistaa saman palstan harventamisen useaan kertaan. Toistot auttavat oppimista, mutta tutkimuksessa toistettavuus on myös tärkeää.

5 VERKOSTOITUMINEN JA KOHDEMARKKINOINTI

5.1 Johdanto

PUUSTI-hankeen yhtenä keskeisenä tavoitteena oli tuoda uudet menetelmät käytäntöön. Tämän toteuttamiseksi hankkeessa järjestettiin metsäretkiä demonstraatio palstoille hakkuiden suorittamisen jälkeen. Näin menetelmiä saatiin tuotua metsän omistajille ja metsäalan toimijoille. Kohdemarkkinoinnin avulla tutkittuja menetelmät tuotiin tutuiksi metsäomistajille, joiden metsissä menetelmiä voitaisiin hyödyntää.

5.2 Metsäretket

Käytäväharvennusretkeily metsänomistajille järjestettiin Pieksämäen demonstraatiohakkuu työmaalle 2.9.2020. Retkeilyn aiheena oli nuorten metsien käsittelyjen ja vaihtoehtoisten hoitomenetelmien esitleminen, erityisesti käytäväharvennus nuoren metsän harvennusmenetelmänä. Retkeilylle osallistui 25 metsänomistajaa ja retkellä kuultiin PUUSTI-hankkeen asiantuntijoiden lisäksi paikallisen energiapuun hankkijan ja metsänhoitoyhdistyksen ajankohtaiset puheenvuorot metsänomistajille.

Käytäväharvennus nuorten metsän käsittelyvaihtoehtona webinaari pidettiin 19.11.2020. Webinaarissa oli mukana 50 osallistujaa edustaen metsänomistajia, korjuuyrittäjiä ja metsätoimijoita. Webinaarissa Luonnonvarakeskuksen erikoistutkija MMT Yrjö Nuutinen esitteli tähän saakka tehdyn tutkimuksen perusteella kokemuksia ja havaintoja käytäväharvennuksesta nuoren metsän käsittelymenetelmänä, mitä tällä hetkellä tiedetään ja mitä jatkotutkimuksen tarpeita on.

Väyläharvennus retkeily korjuuyrittäjille ja metsäammattilaisille Haukivuoren pilttikohteelle järjestettiin 17.11.2021. Retkeilylle osallistui 20 nuorten metsien käsittelyn ammattilaista. Retkeilyllä jaettiin kokemuksia väyläharvennuksesta demonstraatiohakkuun perusteella ja käytiin vilkasta keskustelua nuorten metsien käsittelyn ja korjuutyön kehittämisestä. Metsälehti toimittaja osallistui retkeilylle ja Metsälehti uutisoi PUUSTI-hankkeesta ja väyläharvennuksen kokemuksista 2.12.2021 julkaistussa numerossa.

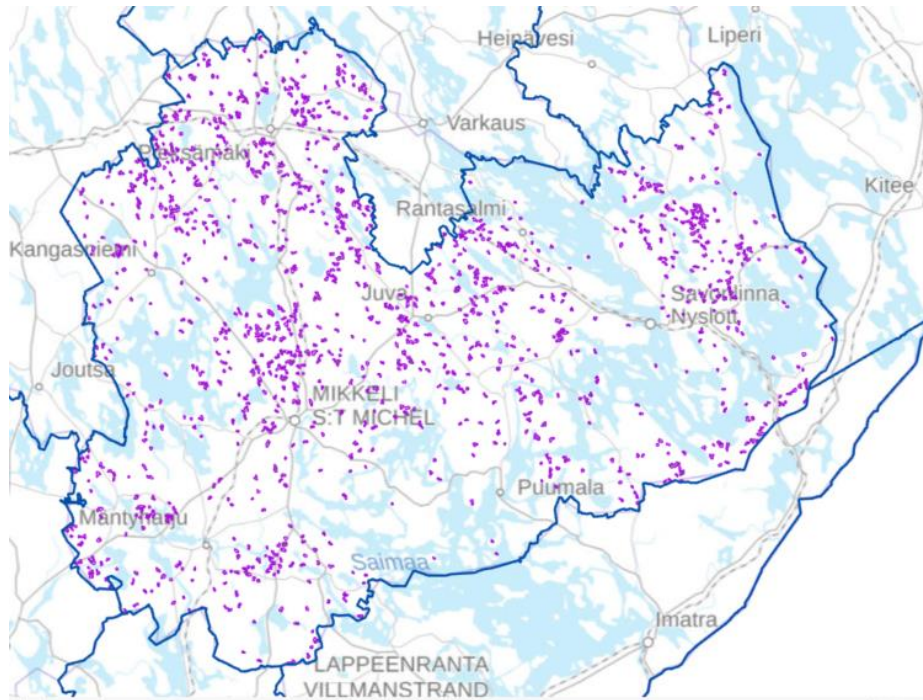
5.3 Kohdemarkkinointi

Metsänomistajien kohdemarkkinointia varten metsävaratiedosta poimittiin vähintään 5 ha ensiharvennuskeskittymät. Ensiharvennuskeskittymät muodostuvat enintään 300 metrin päässä metsäautotiestä ja enintään 250 metrin päässä toisistaan sijaitsevista metsäkuvioista, joilla on toimenpidesuositus ensiharvennuksesta vuodelle 2021 (Kuva 19).

Pienpuun hankinnan kohdentaminen ensiharvennuskeskittymiin parantaa kannattavuutta. Kohteiden omistajille lähetettiin tiedotekirjeitä yhteensä 2458 kappaletta, perinteisiä paperikirjeitä 1293 kappaletta ja sähköpostikirjeitä 1165 kappaletta. Karttatulosteita tiedotekirjeiden mukana ei lähetetty. Metsänomistajia kannustettiin kirjautumaan Metsään.fi palveluun, missä kartat hoitotyö- ja hakkuuehdotuksista ovat nähtävillä.

Metsänomistajille lähetetyssä tiedotekirjeessä kerrottiin myös väyläharvennuksen menetelmän pilotoinnista. Väyläharvennuksella on mahdollista lisätä sopivalla kohteella pienpuuharvennuksen kannattavuutta, kun kohdetta ei tarvitse raivata enakkoon. Metsänomistajalle väyläharvennus tarjoaa vaihtoehdon luonnonläheisempään, monimuotoisuutta lisäävään metsänkäsittelyyn.

Tiedotekirjeen lähetyksen jälkeen metsänomistajien yhteydenottoihin ja tiedusteluihin kohteisiin liittyen vastattiin useille kymmenille metsänomistajille.



Kuva 19. Karttaesitys PUUSTI-hankkeen tuottamista Etelä-Savon alueen ensiharvennuskeskittymistä, joilla hakkuuehdotus vuodelle 2021. Ensiharvennuskeskittymien yhteispinta-ala 10507 ha, yhteensä 5390 metsikkökuviota, keskimääräinen kuvion pinta-ala 1,96 ha.

5.4 Uutisointi ja julkaisut

Kohdemarkkinointi ja metsäretket vaikuttavat vain kohderyhmään ja asiasta kiinnostuneisiin. Tämän lisäksi PUUSTI-hanke pyrki aktiivisesti kertomaan toiminnastaan uutisoinnilla ja tieteellisillä julkaisuilla. PUUSTI-hanke oli uutisissa Savon sanomissa, Metsä-lehdessä ja Bioenergia lehdessä. Tieteellisinä julkaisuina hanketta on esitelty juliste muodossa European Biomass Conference & Exhibition -konferenssissa vuosina 2019 ja 2020 (Aalto M. & Tapio R. (2021), Gyawali et al. (2021), Gaudel et al. (2020)).

5.5 Vaikutukset

Hankkeesta tiedottaminen on ollut aktiivista ja hanke on saanut palautetta toimintaan. Suurin osa tästä on ollut positiivista, mutta myös kriittistäkin on vastaan otettu. Metsäretkien aikana keskustelu oli aktiivista ja menetelmän eroavaisuudet perinteisestä harvennuksesta tulivat hyvin esille. Metsäretkille osallistuneiden määrä oli merkittävä, mutta nämä kommentit ovat vain osa metsänomistajien ja

metsäalantoimijoiden kommentteja. Käytäväharvennuksen tunnettavuutta ja miten tähän suhtaudutaan, olisi tarpeellista tutkia laajemmin. Lähtökohtaisesti käytäväharvennus menetelmään suhtaudutaan varauksella ja varsinkin hakkuu jälkeä kritisoitiin.

PUUSTI-hankkeen yhteydessä tehdyn verkostoitumisen tuloksena, käytävähakkuu menetelmän tunnettavuus on kasvanut metsän omistajien ja metsäalan toimijoiden keskuudessa. Uutisoinnin vaikutusta ei pystytä arvioimaan tarkasti, mutta kohderyhmä on laajempi, kuin metsäretkien ja kohdemarkkinoinnin kohderyhmä.

6 PUUSTI-HANKKEEN LOPPUPÄÄTELMÄT

6.1 Hankkeella saavutettiin

Hankkeen testihakkuukohteen tuottivat tärkeätä tietoa käytäväharvennuksen suorittamisesta käytännössä. Korjuujälki oli merkittävin huolen aihe metsänomistajilla ja keskustelu menetelmän hyödyistä ensiharvennuksen yhteydessä oli varauksellista. Menetelmän korjuujälki on erilainen perinteiseen poiminta harvennukseen nähden, mutta tämä ei välttämättä ole huono asia. Harvennuksen jälkeen metsä on monimuotoisempaa ja lajisekoittuma on saman tyyppinen, kuin ennen harvennusta. Käytäväharvennuksessa voidaan vain vähän vaikuttaa poistettavaan puustoon, jonka takia poistettava puusto on monilajisempaa ja pienempää, kuin poiminta harvennuksessa. Menetelmä sopii hyvin riutuuntuneelle nuorelle metsä palstalle, josta poimitaan energiapuuta.

Lennokki kaukokartoituksesta ei metsänhoidon yhteydessä nähty olevan hyötyä, kun avoimen metsä tietueen avulla päästiin riittävään tarkkuuteen metsänhoidon arviointiin. Lennokki kuvaukset olivat tarkempia, jolloin niitä voidaan hyödyntää tutkimuksissa ja opetuskäytössä. Esimerkiksi simulaattoriin voidaan tuoda todellinen puusto lennökkikuvauksien avulla.

Lennokki kuvauksien yhtenä käyttökohteena oli simulaatio, jonka avulla voitiin arvioida käytäväharvennuksen poistumaa. Poistuman arviointi toi esille puuston vaikuttavan suuresti ja käytävien leveyden ollessa 1-3 metriä, pitää hakkaamattoman alueen leveys olla 1-6 metriä. Näin epätarkkaa arviota ei voida käyttää yleisenä ohjeena, joten jokaisella palstalla tarvitsee käytäväharvennuksen dimensiota arvioida poistuman tarpeen mukaan. Apuna voi käyttää yhtälöä, jossa merkittävä osa muuttujista kannattaa ottaa harvennuksessa käytettävän koneen ominaisuuksista.

Hanke toteutettiin neljässä osatehtävässä ja näiden saavutukset lyhyesti:

1. Etelä-Savon metsikkö- ja konekohtainen malli
 - 1.1. Metsien laserkeilausaineiston kohdekäsittely

Kaksi palstaa käsiteltiin avoimella metsätietueella ja näiden tarkkuus oli riittävä metsän hoitosuunnitelmaan.

1.2. Konekohtainen mallinnus

Agenttipohjainen simulointimalli kehitettiin ja tämän avulla arvioitiin käytäväharvennuksen dimensioiden vaikutusta poistumaan.

2. Koneyrittäjien verkostoituminen ja metsänomistajien kohdemarkkinointi

2.1. Verkostoitumisen työpajat

Järjestettiin kaksi metsäretkeä käytäväharvennus kohteille

2.2. Kohdemarkkinointi

Suoritettiin kohdemarkkinointi kampanja, jossa otettiin yhteyttä 2458 metsän omistajaan.

2.3. Loppukäyttäjien tarpeet

Loppukäyttäjien tarve energiapuun käytölle todettiin olevan suuri. Tulokset osoittavat käytäväharvennus menetelmän olevan yksi mahdollisuus täyttää tätä tarvetta. Tärkeintä on aktivoida metsänomistajia ja parantaa korjuun kustannustehokkuutta yrittäjille eri keinoin, jotta nuorten metsien kunnostusrästit saadaan hoidettua

3. Uusien menetelmien testaus ja käyttöönotto

3.1. Käytäväharvennuksen toteutus

Toteutettiin kaksi käytäväharvennus testihakkuuta

3.2. Nuoren metsän paikalliskohteiden laserkeilaus lennokilla

Toteutettiin ilmakeilaus ja laserkeilaus lennokilla ennen ja jälkeen käytäväharvennuksen yhdelle kohteelle.

3.3. Käytännön korjuuohjeet

Tuotettiin poistuman arviointiin työkaluja ja käytäväharvennus kohteilta opittiin menetelmän sopivuudesta eri kohteille.

4. Hankkeen koordinointi ja tulosten raportointi

Hankkeen tuloksia julkaistiin useassa konferenssi julkaisussa ja lehtiartikkelissa. Loppuraportti julkaistiin LUTPub portaalissa.

6.2 Suositukset jatkotoimille

Metsänomistajien kiinnostusta uutta menetelmää kohtaan tulisi selvittää. Pienpuun hankinnan ja korjuun kustannustehokkuuden parantamiseksi lisätutkimusta

tarvitaan ennakkoraivauksen tarpeesta ja voidaanko korjuumenetelmää kehittää niin, että ennakkoraivauksesta voitaisiin osalla nuoren metsän kunnostuskohteita luopua korjuutyön laadusta ja kustannuksista tinkimättä.

Nuorten metsien kaukokartoitus tuotti hankkeessa paljon lisätietoa. Vaikka metsän hoitosuunnitelmassa tarkempi kuvaus ei ole pakollista, tutkimukselle ja opetukselle tarkempi kuvaus oli hyödyllistä. Laajempien lennökkikuvauksien avulla voitaisiin tuottaa opetusmateriaalia korjuusimulaattorille. Myös suuri määrä mitattuja puustotietoja mahdollistaisi runkotilavuusmallien tarkastelun.

Hankkeessa suoritettiin kaksi käytäväharvennus menetelmän testihakkuuta. Näissä opittiin paljon käytännön työnteemisestä ja hakkuukohteen tärkeydestä. Vastavien testihakkuuta tarvitsisi suorittaa eri hakkuupalstoille, jotta menetelmän hyödyt ja haitat tulisivat eri puustoissa esille. Menetelmän systemaattisuus on hakkuukoneen kuljettajien toimesta todettu erilaiseksi ja kuljettajan vaikutus menetelmän toimivuuteen on tarkastelematta. Myös mahdollisten hybridi menetelmien tarkastelu olisi mahdollinen tapa vaikuttaa erilaiseen hakkuujälkeen.

Hankkeessa kehitetty simulointimallin jatkokehittäminen vertailututkimukseen kykeneväksi olisi hyvä tapa tarkastella poiminta- ja käytäväharvennuksen eroja. Poimintaharvennuksen ollessa epäsystemaattinen, vaatii mallin logiikan kehittämistä, mutta tämä on mahdollista. Simulointimalliin olisi myös hyvä saada tuotua suurempi metsikkö tietue, jolloin voitaisiin tarkastella suuremman metsäpalstan harvennusta simuloinnilla.

LÄHTEET

- Haapalainen, J. (2020). Forest machinery productivity study with data mining.
- Bergström, D. (2019). Cost analysis of innovative biomass harvesting systems for young dense thinnings. *Croatian Journal of Forest Engineering: Journal for Theory and Application of Forestry Engineering*, 40(2), 221-230.
- Bergström, D., Bergsten, U., & Nordfjell, T. (2010). Comparison of boom-corridor thinning and thinning from below harvesting methods in young dense Scots pine stands. *Silva Fennica*, 44(4), 669-679.
- Bergstrom, D., Bergsten, U., Nordfjell, T., & Lundmark, T. (2007). Simulation of geometric thinning systems and their time requirements for young forests. *Silva Fennica*, 41(1), 137.
- Nuutinen Y., Miina J., Saksa T., Bergström D., Routa J. (2021). Hakkuukoneella tehtävän väyläharvennuksen vaikutus harvennuskertymään ja kasvatettavaan puustoon nuorissa metsissä. *Metsätieteen aikakauskirja vuosikerta 2021* artikkeli id 10623. <https://doi.org/10.14214/ma.10623>
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D. L., Polhill, J. G., Giske, J., & Railsback, S. F. (2010). The ODD protocol: a review and first update. *Ecological modelling*, 221(23), 2760-2768.
- Metsäkeskus (2021). Metsävaratiedon laatuseloste. <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/metsavaratiedon-laatuseloste.pdf>.
- Khosravipour, A., Skidmore, A. K., Isenburg, M., Wang, T., & Hussin, Y. A. (2014). Generating pit-free canopy height models from airborne lidar. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 80(9), 863-872.
- Nischan, M., Joseph, R., & Libby, J. (2003). Active spectral imaging. *Massachusetts Institute of Technology*, 14(1), 131-144.
- Maltamo, M., Packalén, P., Kallio, E., Kangas, J., Uuttera, J. & Heikkilä, J. (2011). Airborne laser scanning based stand level management inventory in Finland. In *Proceedings of SilviLaser 2011, 11th International Conference on LiDAR Applications for Assessing Forest Ecosystems*, University of Tasmania, Australia, 16-20 October 2011 (1-10).

Peuhkurinen, J. & Villikka, M. (2021). Ilmalaserkeilaus virtuaalimetsän apuaineis-
tojen tuottamisessa. In Korhonen, M. (eds) Metsävara- ja paikkatietoaineistoon pe-
rustuva virtuaalimallinnus, Lapin ammattikorkeakoulu, 29–41.

Zianis, D., Muukkonen, P., Mäkipää, R., & Mencuccini, M. (2005). Biomass and
stem volume equations for tree species in Europe. FI.

Gyawali, A., Peuhkurinen, J., Villikka, M., Aalto, M., & Ranta, T. (2021) Estima-
tion and comparison of tree attributes in young forest using different remote sens-
ing: drone lidar, aerial photogrammetry, and open forest data. Manuscript.

Ulvcrona, K. A., Bergström, D., & Bergsten, U. (2017). Stand structure after thin-
ning in 1–2 m wide corridors in young dense stands. *Silva Fennica*, 51(3), 1563-
1563.

Aalto, M. & Tapio, R., (2021). Estimating the Thinning Removal of Boom-Corridor
Harvesting with Agent-Based Simulation Model. 29th European Biomass Confer-
ence and Exhibition, 36 – 39.

Gyawali, A., Peuhkurinen, J., Villikka, M., Aalto, M. & Ranta, T. (2021). Estima-
tion and Comparison of Tree Attributes in Young Forest Using Different Remote
Sensing: Drone LiDAR, Aerial Photogrammetry, and Open Forest Data. 29th Eu-
ropean Biomass Conference and Exhibition, 310 – 314

Gaudel, R., Aalto, M. & Ranta, T. (2020). Promotion of Sustainable Wood Supply
through Digitalization and Networking -Puusti. 28th European Biomass Confer-
ence and Exhibition, 89 - 91

ODD BOOM-CORRIDOR THINNING MODEL

The model description follows the ODD (Overview, Design concepts, Details) protocol for describing individual- and agent-based models (Grimm et al. 2006, 2010).

1. Purpose

The model's purpose is to simulate harvester movement at a forest stand under working conditions. The model was developed to investigate boom-corridor thinning, a geometrical harvesting method. The geometrical harvesting method allows the movement of the harvester to be systematic and easily reproduced. The model imports forest stands information from a spreadsheet file, allowing use of real forest stand information. The model was developed with Anylogic simulation software.

2. Entities, state variables, and scales

The model constructs from four agents: Main, Harvester, Crane and Tree. Main is the environment where other agents live. Environmental have X and Y coordinates with the scale of meters. All results are gathered to the main agent for easy access and presentation. The Main agent has a flowchart that indicates when and where the harvester moves.

The harvester agent is a moving agent that is responsible for selecting the trees that will be harvested. The harvester has parameter speed, which indicates how fast it moves in the environment. The movement of the harvester is only a straight line from the starting point to the end point. The harvester has a list variable, *c_CutTrees*, which stores the list of trees to cut. The harvester is visualized with an image of a machine that is not set to scale.

Inside a Harvester agent is a Crane flowchart. This chart tells us when the Crane agent moves and where. The harvester also includes harvesting areas that populate trees to the *c_CutTrees* list. These harvesting areas are rectangle areas that are created based on user input values and harvesting type. The creation of the areas is described more detail in **7. Submodels**.

The crane agent represents harvester cut head. The crane can move from the harvester to the tree that will be cut. The crane has attributes for location, for how many trees can be carried at once, how many trees are carried and speed information for different movements. After a cut, the *c_CutTrees* list is updated by removing the cut tree from the list. The crane is visualized as cutting head with a yellow circle.

The tree agent is representation trees in the forest stand. These are set in the environment based on the spreadsheet file and are visualized using black circles. Visualization is not on the scale, but the circle's radius is in relation to the diameter of the tree. Trees have properties of height, diameter, locations, volume, and species. Trees have Boolean variables to indicate whether they will be cut and visibility, for hiding the visual presentation if a tree is cut. Properties of trees are gathered into the results set if three are cut down. The initial number of trees is also recorded and how many trees were cut by the harvester.

The harvester agent has a total of 11 different states. These states are explained at table 1 with entry and exit conditions and a state chart is presented in Figure 1. These states trigger the harvester and the crane movement and timeouts that represent the events of the harvester, like the felling of a tree. As states are in the harvester and some triggers come from the crane, messages are used to trigger. This means that the agent that activates a trigger sends a message to another agent to inform them of activation.

Table 1. Harvester states and entry and exit conditions.

Name	Purpose	Enter condition	Exit condition
S_Working	Indicates if the harvester is working. True if not in s_End state.	Start of the simulation.	Harvester location outside harvested plot.
s_SelectTrees	Run script to select harvested trees.	Start of the harvest and after harvester has moved.	Script has been run.
s_CraneOut_CR	Crane moves close to the tree to cut it down	Collection c_CutTrees has elements in it	Crane agent sends message "Crane near Tree" indicating crane arrived at its destination.
s_Positioning_CR	Slower movement to grab the tree to cut it down	Enter from s_CraneOut_CR or s_CraneInBetween_CR	Time out [Positioning time]
s_Felling_CR	Cutting down the tree.	Enter from s_Positioning_CR	Time out [Felling time]
s_CraneInBetween_CR	Move crane from cut-down tree to next tree to cut down.	Enter from s_Felling_CR if c_CutTrees has elements in it and crane has room for more trees	Crane agent sends message "Crane near Tree" indicating crane arrived at its destination.
s_CraneIn_CR	Move crane toward harvester.	Enter from s_Felling_CR if c_CutTrees does not have elements in it and crane does not have room for more trees.	Crane agent sends message "Crane at home" indicating crane arrived at its destination.
s_Bunching_CR	Set trees in the pile next of harvester.	Enter from s_CraneIn_CR.	Time out [Bunching time]
s_PreMoving	Prepare to move harvester.	Enter from s_SelectTrees or s_Bunching_CR if c_CutTrees does not have elements in it and first cut area is selected.	Time out [Prepare time to move]
s_Moving	Move harvester to next location.	Enter from s_preMoving.	Harvester arrives to the destination.
s_End	Mark end of the simulation.	Harvester location outside harvested plot.	End of the simulation.

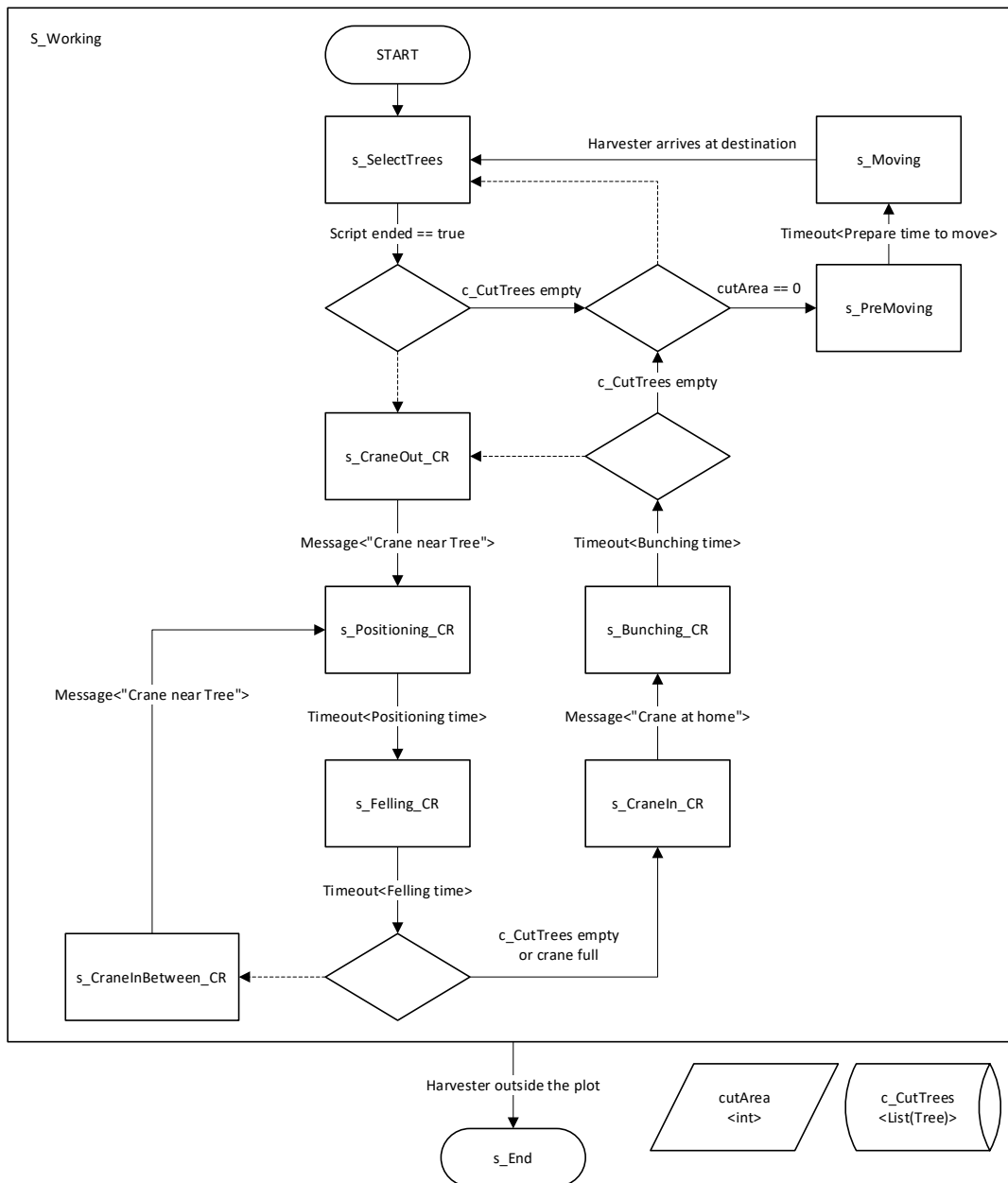


Figure 1. State chart of the model. Dash lines indicate default selection as if all other conditions return false. At bottom right are presented data referenced in the states.

3. Process overview and scheduling

At the start of the model, forest stand is generated. Information of tree location and other properties are imported from the spreadsheet file. Based on these values, tree agents are created and spatially distributed to the environment agent. After forest stand generation, the harvester is set at the bottom of the forest stand.

The harvester begins by inspecting the harvesting area to see whether there are any trees that need to be cut down. The first area to check is at the front of the agent. Cutting the trees from this area allows the harvester to move forward, creating a strip road in the process. If the harvesting area contains trees, the harvester remove trees. This process is named a Harvest in Figure 2. The first closest tree is selected, and the crane is moved to the tree. The tree is felled and if there is more room in

the harvesting head and there is a subsequent tree to fell, the crane will move there. If the head is carrying the maximum number of trees, it will unload head next to the harvester. If all trees are gathered, the crane will unload and the harvesting process will end, triggering a selection of the next harvesting area. This will be recurrent until all harvesting areas from the list are processed and then harvester will move forward and repeat the harvesting of all harvesting areas again, until it reaches the end of the harvesting area.

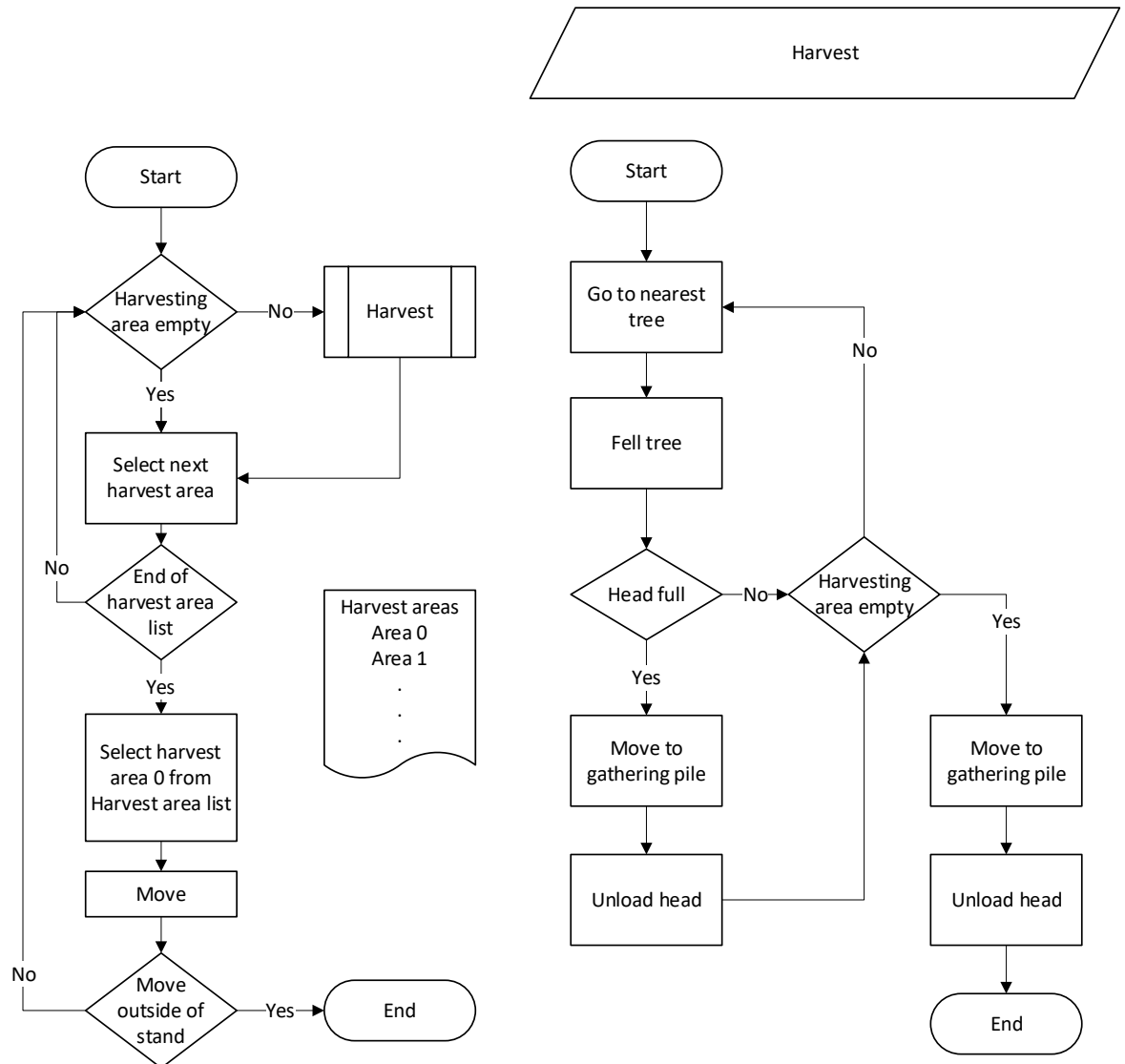


Figure 2. Flowchart of the harvester logic.

4. Design concepts

The model was developed to mimic harvester performing boom-corridor harvesting. The harvester movements are systematic and work states are distinct. Harvesting movements and felling of the tree was carried out with interactions between the harvester, the environment, and crane agents. Harvest work stages were the main building blocks and events inside the stages were to be triggered based on user input values and interactions between the harvester and the crane agent.

The harvesting area was assumed to be rectangular. The dimensions of harvesting areas are based on user input values. Positioning harvesting areas are based on harvester agent location and the selected harvesting method. Positioning of the areas is explained in section 7. Submodels.

5. Initialization

At the beginning of the model, agents are created. Trees are initialized based on spreadsheet file information and located in the environment. The harvester is set to the starting point and all attributes are set based on user input values. Inside the harvester, harvester areas are created based on user selection and harvesting area setup script is run. The crane is set to the front of the harvester and its attributes are set up based on user input values.

6. Input data

The forest data is imported from a spreadsheet file. This file includes information at the individual tree level. The column's names are shown in Table 2 and the explanation of the data is under this column.

Table 2. Individual tree-level information column names and information about values.

ID	Identification number
x	Location [scale in m]
y	Location [scale in m]
Species	Int value to indicate species
dbh	Diameter at breast height [cm]
height	Height [m]
volume	Volume of the tree [m ³]

Before the start of the simulation, the user can set a number of values. These values, input type and explanation are presented in Table 3.

Table 3. User input values, type of input, unit and explanation.

Value	Type	Unit	Explanation
Strip road width	double	Meters	Width of cut area at front of harvester
Corridor width (cut area)	double	Meters	Width of cut area at side of harvester
Strip width (uncut area)	double	Meters	Width of cut area at side of harvester
Harvester speed	double	Meters/Second	Movement speed of the harvester
Crane speed out	double	Meters/Second	Harvester head speed, when moving from harvester toward tree
Crane speed in	double	Meters/Second	Harvester head speed, when moving toward harvester
Crane speed between	double	Meters/Second	Harvester head speed, when moving from one tree to another tree
Positioning time	double	Seconds	Time to Grable tree
Felling time	double	Seconds	Time to cut tree
Bunching time	double	Seconds	Time to set cut trees next to harvester in pile
Prepare to move time	double	Seconds	Time it to take harvester to prepare it to be moved
Max number trees in the head	int		Number of trees that a crane can carry at once

User can also set harvesting type using a radio button. Two different types are present: Perpendicular boom-corridor and fan-shaped boom-corridor. The perpendicular boom-corridor sets two corridors at 90 degrees from the harvester. The fan-shaped boom-corridor set four corridors at 45 degrees from the harvester.

7. Submodels

Harvester areas are set based on user input values. These are assumed to be rectangles and reach 10 meters from the middle of the harvester. The width of the rectangles are set based on user input values, Strip road width and Corridor width. Strip road width is used to cut area at the front of the harvester and is set parallel to the harvester. This is the same for all harvesting types. Corridor width is used to set the width of cut areas on the side of the harvester. The number of these is based on harvesting type. If a perpendicular boom-corridor is selected, two areas are created and set perpendicular to the harvester on both sides. If a fan-shaped boom-corridor is selected, four areas are created, and these are set on a 45-degree angle up and down from a horizontal line on both sides of the harvester. Areas are attached to the harvester at the front of the machine.

The movement flowchart of the harvester and crane are simple. The Flowcharts only include a queue element, where the agent waits a destination. When the agent acquires destination information, it transfers to the MoveTo element, where an agent begins a trip to its destination based on its own location, destination location and movement speed.

ISBN 978-952-335-815-7 (PDF)

ISSN-L 2243-3376

ISSN 2243-3376

Lappeenranta 2022

 LUT
University