

Kohti ilmastokestävämpää ja
monimuotoisempaa puunkorjuuta
sensoriteknologian ja tarkan
paikkatiedon avulla
(IlmoStar)

LOPPURAPORTTI 22.10.2025



**Euroopan unionin
rahoittama**

NextGenerationEU



Maa- ja metsätalousministeriö

Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI
Itä-Suomen yliopisto
Luonnonvarakeskus
Ponsse Oyj

Sisällysluettelo

1. Hankkeen esittely.....	2
1.1. Perustiedot hankkeesta.....	2
1.2. Hankkeen tavoitteet.....	2
1.3. Yhteenveto hankkeesta.....	2
2. Hankkeen toteutus ja toteutusvaiheen arviointi.....	4
2.1. Menetelmät ja aineisto.....	4
2.2. Aikataulu ja resurssit (sis. toteutuksen organisaatio ja yhteistyökumppanit).....	6
2.3. Kustannukset ja rahoitus.....	6
2.4. Raportointi, julkaisut ja seuranta.....	7
2.5. Toteutusvaiheen arviointi.....	12
2.6. DNSH-kriteerien toteutuminen.....	13
3. Tulokset ja niiden arviointi.....	14
3.1. Tulosten esittely.....	14
Metsäkoneen ja hakkuulaitteen paikannustarkkuuden parantaminen.....	14
Sensoridatan käyttö puiden, niiden ominaisuuksien ja puuvalinnan määrittämiseen.....	17
Sensoridatan käyttö metsän rakenteen arviointiin.....	18
Metsäkoneenkuljettajien haastattelututkimus.....	19
Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 -visio.....	20
3.2. Tulosten vieminen käytäntöön.....	21
3.3. Tulosten merkitys ja jatkotoimenpiteet.....	22

1. Hankkeen esittely

1.1. Perustiedot hankkeesta

Kohti ilmastokestävämpää ja monimuotoisempaa puunkorjuuta sensoriteknologian ja tarkan paikkatiedon avulla (IlmoStar) -hanke toteutettiin aikavälillä 1.3.2023 – 30.10.2025 yhteistyössä Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI:n (koordinaattori), Itä-Suomen yliopiston (UEF), Luonnonvarakeskuksen (LUKE) ja Ponsse Oyj:n kanssa.

1.2. Hankkeen tavoitteet

Maankäyttösektorin ilmastosuunnitelman päämääränä on kestävä kehityksen tavoitteiden mukaisesti edistää maankäytön, metsätalouden ja maatalousmaan päästöjen vähentämistä, nielujen aikaansaamien poistumien vahvistamista sekä sopeutumista ilmastonmuutokseen. Metsien hiilensidontaa voidaan vahvistaa metsien kasvukyvystä ja terveydestä huolehtimalla. Hankkeessa tutkittava, kehitettävä ja testattava teknologia tukee menetelmäkehitystä, jossa paikkatarkasti puunkorjuun yhteydessä voidaan opastaa metsäkoneen kuljettajaa metsänkäsittelyyn, joka parhaiten ylläpitää ja vahvistaa hiilinieluja ja -varastoja pitkällä aikavälillä, varmistaa metsäluonnon monimuotoisuuden ja elinympäristörakenteiden säilymisen sekä tuottaa paikka- ja määrätarkkaa tietoa talousmetsien tilasta. Tämän tiedon avulla voidaan tuottaa aiempaa tarkempaa ja ajantasaisempaa tietoa metsän hiilensidonnasta ja sen kehityksestä. Kehitettävällä sensorijärjestelmällä monimuotoisuus metsäluonnon ottaa paremmin huomioon ja täten lisätä luonnon monimuotoisuutta talousmetsissä.

1.3. Yhteenveto hankkeesta

Hankkeen painopisteenä oli tulevaisuuden hakkuukone, jonka paikannus- ja mobiililaserkeilausjärjestelmät parantavat ilmastokestävän ja metsäluonnon monimuotoisuuden huomioon ottavan puunkorjuun toteutumista.

Hankkeen toteuttivat Maanmittauslaitoksen Paikkatietokeskus FGI (koordinaattori, hankkeen johtaja Harri Kaartinen), Itä-Suomen yliopisto (osa-hankkeen johtaja Kalle Kärhä), Luonnonvarakeskus LUKE (osa-hankkeen johtaja Kari Väättäinen) ja Ponsse Oyj (osa-hankkeen johtaja Joni Backas).

Hankkeen kokonaisbudjetti oli 1,94 miljoonaa euroa, josta rahoittajan osuus oli 1,28 miljoonaa euroa ja omarahoitusosuudet olivat yhteensä 0,67 miljoonaa euroa.

Hankekokonaisuus koostui neljästä työpaketista, joissa testattiin ja kehitettiin uusia kustannustehokkaita ratkaisuja hakkuukoneen kuljettajan tukijärjestelmän luomiseksi kohti ilmastokestäviä ja metsäluonnon monimuotoisuutta turvaavia koneellisen metsänhoidon ja -käsittelyn työmenetelmiä hyödyntäen täsmäpaikannusta ja metsäkoneeseen integroitua mobiililaserkeilainta.

Työpakettin 1 painopisteenä olivat koetoinä toteutettavat hakkuukoneeseen asennettavat erilaiset paikannusratkaisut ja konenäkösensorit sekä erilaiset hakkuukoneen kuljettajan avustamisen kokonaisratkaisut. Hankkeessa toteutettiin kaksi konsortion yhteistä koetyötä (syksyt 2023 ja 2024) Evolla Hämeen ammattikorkeakoulun hallinnoimilla metsäpalstoilla.

Työpaketti 2 keskittyi hakkuukonedatan paikannus- ja sensoridatan validointiin ja tulkintamenetelmien kehittämiseen. Työpaketissa kehitettiin menetelmiä Työpakettin 1 datoilte kohti reaaliaikaista tulkintaa. Tulkintamenetelmiä kehitettiin tukemaan metsäluonnon monimuotoisuuden säilyttämistä erityisesti talousmetsien puunkorjuuoperaatioissa tinkimättä kuitenkaan korjuuoperaatioiden taloudellisesta tehokkuudesta. Menetelmäkehityksessä hyödynnettiin kaikkien toimijoiden aiemman kehitystyön tuloksia.

Työpaketissa 3 hyödynnettiin edellisten työpakettien aineistoja ja menetelmiä tulevaisuuden hakkuukoneen suorituskyvyn demonstroimiseen metsäluonnon monimuotoisuuden, hiilensidonnan ja taloudellisen tehokkuuden parantamisessa ja mittaamisessa. Työpaketissa 3 toteutettiin hakkuukoneen kuljettajien haastattelututkimus siitä, miten tieto tulisi jakaa ja esittää heille hakkuutyön aikana. Lisäksi Työpaketissa 3 tehtiin erilaisten sensoreiden vertailuja.

Työpaketissa 4 tehtiin edellisten Työpakettien (1-3) perusteella läpileikkaava synteesi tuloksista, mahdollisuuksista, riskeistä ja uusista ideoista, minkä pohjalta luotiin Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 -visio yhdessä hankkeen toimijoiden kanssa. Alkuperäisessä tutkimussuunnitelmassa tulokseksi suunniteltiin Tiekartta 2030 -visio, mutta hankkeen loppupuolella tiekarttaa laadittaessa totesimme, että visio on järkevämpää ulottaa vuoteen 2035 asti. Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 julkaistiin Itä-Suomen yliopiston julkaisusarjassa (Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 10/2025).

Hankkeen työn tavoitteena oli tukea täsmämetsänhoidon ja -puunkorjuun kehitystä huomioiden metsäluonnon arvokkaat elinympäristöt, monimuotoisuuden sekä suojeltavat ja säästettävät luontokohteet aiempaa täsmällisemmin. Hakkuukoneen ja hakkuulaitteen paikannustarkkuuden paraneminen tuo kaivatun digi- ja tuottavuusloikan puunkorjuuseen, kun hakkuutyö tehostuu puuvalinnassa ja harvennusvoimakkuuden hallinnassa sekä kun tilarajat, luontokohteet ja katkotut puutavaralajit tunnistetaan nopeasti ja täsmällisesti. Tämä tukee myös täsmällisempää ja automaattisempää korjuutyön laaturaportointia, jossa paikkatarkasti todennetaan esimerkiksi säästöpuuryhmät, arvokkaat suuret lehtipuut (erityisesti haapa) ja vanhat puut, lahon maa- ja pystypuun määrä, tehdyt tekopökkölöt, puulajisuhteet, vesistöjen ja pienvesien suojakaistojen riittävät leveydet sekä korjuujälki (harvennusvoimakkuus, ajouran leveys ja ajouraväli) työmaalla.

Hankkeessa saadun uuden tietämyksen avulla esitetään ratkaisuja ja innovaatioita tarkkaan paikkaan sidotun konenäkö tiedon hyödyntämiseen hakkuukoneen kuljettajan tukijärjestelmissä. Hankkeessa selvitetään myös, miten kuljettavaa tukevan järjestelmän tieto tulisi esittää ja havainnollistaa metsäkoneen kuljettajalle mahdollisimman selkeällä tavalla. Tavoitteena oli kehittää kansainvälisesti kilpailukykyinen tulevaisuuden metsätalouden arvoketju huomioiden myös metsänkasvatuksen kehitystarpeet niin tasaikäisrakenteisessa kuin jatkuvapeitteisessäkin metsässä. Laite- ja menetelmätestauksen keinoin ja konkreettisella yhteistyöllä Ponssen kanssa pyrittiin osoittamaan toimivia ja

kustannustehokkaita ratkaisuja hakkuukoneen kuljettajan tukijärjestelmän kehittämiseksi, missä täsmäpaikannusta ja metsäkoneeseen integroidun laserkeilaimen tuottamaa tietoa hyödynnetään tulevaisuuden ilmastokestävissä ja metsäluonnon monimuotoisuutta turvaavissa koneellisen metsänhoidon ja -käsittelyn työmenetelmissä.

Hankkeen keskeiset tulokset on kuvattu erillisjulkaisussa Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 -visio, jossa kuvataan tehdyn työn perusteella metsäkonetiedon ja sensoreiden hyödyntämisen nykytila sekä tulevaisuuden teknologiset mahdollisuudet, haasteet ja riskit. Hankkeessa syntyi myös useita tieteellisiä julkaisuja, joissa kuvataan sekä teknologista että metsän eri piirteiden määrittelyn menetelmäkehitystä. Hankkeessa on testattu ja kehitetty menetelmiä hakkuukoneen paikannuksen parantamiseen muun muassa ennakkotiedon, SLAM-menetelmien (Simultaneous Localization and Mapping) ja radiomajakateknologian perusteella. Metsäkoneen sensoreiden keräämälle havaintodatalle on kehitetty tulkintamenetelmiä puiden ja niiden ominaisuuksien tunnistamiseen, harvennustiheyden arviointiin, aluskasvillisuusanalyysiin, metsän rakenteellisen diversiteetin arviointiin, sekä itse koneen paikan ja asennon määrittelyyn suhteessa ympäröivään metsään. Tärkeä tulos on myös hankkeessa toteutettu metsäkoneenkuljettajien haastattelututkimus siitä, mihin he kaipaavat eniten tukea työssään, ja miten esimerkiksi kerätyn sensoridatan ja ennakkotiedon perusteella tuotettu ohjaustieto puuvalintaan ja hakkuurajoitusten suhteen olisi paras heille esittää.

Hankkeessa julkaistiin 16 vertaisarvioitua tieteellistä artikkelia, kolme on hyväksytty julkaistavaksi, kolme käsikirjoitusta on arviointiprosessissa ja yksi on tekeillä (tarkka listaus kappaleessa 2.4.). Lisäksi julkaistiin 9 muuta tieteellistä artikkelia, 25 blogitekstiä tai esitystä, kaksi hankeosapuolten kirjoittamaa lehtiartikkelia sekä useita lehtiartikkeleita hankkeen koetyöhön liittyvän mediakutsun perusteella.

2. Hankkeen toteutus ja toteutusvaiheen arviointi

2.1. Menetelmät ja aineisto

Hankkeessa toteutettiin kaksi kenttäkoetta, joissa tutkimusaineistoja kerättiin Ponssen harvesteriin asennetuilla erilaisilla paikannus-, laserkeilaus- ja kamerajärjestelmillä (kuva 1). Lisäksi menetelmäkehityksessä ja suorituskyykyarvioinneissa hyödynnettiin näiden kokeiden aineistojen lisäksi jo aiemmin vuonna 2022 vastaavilla laitteistoilla kerättyjä aineistoja. Kenttäkokekohteet edustivat erilaisia metsänhoitokohteita: talvella 2022 koekohte oli järeähkön kuusikon harvennus, syksyllä 2023 koekohteessa toteutettiin sekametsän toinen harvennus ja osalla alueesta päätehakkuu, ja syksyllä 2024 kyseessä oli ensiharvennuskohde, josta osa oli ennakkoraivaamatonta. Koekohteet edustivat siis hyvin erilaisia metsiköitä puulajien, alikasvoksen ja kasvuvaiheen osalta.



Kuva 1. Kuvassa näkyy osa syksyn 2024 koetyössä mukana olleista laserkeilaussensoreista ylhäällä puomin molemmien puolin sekä ohjaamon sivuilla ja edessä keskellä. Lisäksi ohjaamon yläpuolella keskellä puomia näkyy 360-kamera. Näiden lisäksi puomin päällä oli useita GNSS-paikannuslaitteita sekä radiopaikannuksen vastaanotin. (Kuva: H. Hyyti 2024)

Harvesterin paikkareferenssi kerättiin robottitakymetrimittauksin, takymetrin seuraama mittausprisma oli asennettuna harvesterin katolle. Syksyn 2023 ja 2024 koetöissä kaadettujen puiden kannot mitattiin satelliittipaikannuksella. Kaikissa kohteissa tutkimusaineistoja kerättiin myös kannettavilla laserkeilausjärjestelmillä sekä droonikuvauksilla ja - laserkeilauksilla harvesterioperaatioita ennen (alkutilanne) ja niiden jälkeen (lopputilanne).

Metsäkoneenkuljettajien haastattelututkimus toteutettiin kesällä 2025. Haastatteluun osallistui 50 kokemukseltaan erilaista Ponsse-kuljettajaa eri puolilta Suomea. Puolistrukturoidun haastattelurungon avulla pyrittiin selvittämään Likert-asteikollisten kysymysten ohella kuljettajien näkemyksiä työssään kohtaamista haasteista sekä toiveita tulevaisuuden avustaviin järjestelmiin liittyen. Tärkeimmät kehityskohteet tunnistettiin Importance–Performance-analyysin (IPA) avulla. Haastattelun tulokset julkaistaan

opinnäytetyönä (Valtteri Kinnunen: Metsäkoneenkuljettajan tuen tarve ja avustavat järjestelmät tulevaisuudessa, Itä-Suomen yliopisto).

2.2. Aikataulu ja resurssit (sis. toteutuksen organisaatio ja yhteistyökumppanit)

Hankkeessa yhdistyi Paikkatietokeskus FGI:n sensori-, laserkeilaus- ja menetelmäkehitysosaaminen Luken ja UEF:n metsäteknologia-, metsien laserkeilaus- ja biodiversiteettiosaamiseen sekä Ponssen metsäkonekehitykseen. FGI vastasi hankkeen koordinoinnista ja FGI:llä oli päävastuu hankkeen sensori- ja pistepilviteknologiaan liittyvästä testauksesta ja menetelmäkehityksestä. Itä-Suomen yliopisto keskittyi biodiversiteettiin, luontoarvoiltaan arvokkaiden kohteiden tunnistamiseen sekä kustannus-hyöty-analyysihin ja datan omistajuuteen liittyviin kysymyksiin. Luonnonvarakeskus (Luke) keskittyi harvennustiheyden arviointiin ennakkotiedon ja metsäkonedatan avulla sekä puuston kasvutunnusten arviointiin LiDAR-pistepilviaineiston perusteella. Näillä menetelmillä on merkittävä rooli metsien hiilensidonnassa arvioinnissa. Ponsse tarjosi alustan kenttätesteihin ja keskittyi erityisesti reaaliaikamenetelmien kehittämiseen puiden ja niiden vaurioiden tunnistamiseksi laserkeilausaineistosta sekä harvesterin paikannustarkkuuden parantamiseen. Edellä mainittu roolijako ei ollut jyrkkä, jokaisessa työpaketissa tarvittiin kaikkien osapuolten osaamista, joten hankkeen toteutus tapahtui kiinteässä yhteistyössä, lähtien yhteisissä kenttätöissä yhdessä kerätyistä aineistoista ja niiden yhteiskäytöstä.

2.3. Kustannukset ja rahoitus

Projektille myönnetty rahoitus on Ponssea lukuun ottamatta käytetty täysimääräisenä. Hankkeen toteutuneet kustannukset ja vertailu budjettiin toimijoittain on esitetty alla olevassa taulukossa.

	MML/FGI	LUKE	UEF	PONSSE	Yhteensä
Palkkakustannukset	367 156	234 026	274 498	117 827	993 507
Yleiskustannukset	273 458	212 400	189 403	58 913	734 175
Matkat	5 993	10 712	22 586	6 452	45 744
Palvelut	150	7 953	815	120 324	129 243
Julkaisut	3 233	0	2 086	0	5 319
Aineet ja tarvikkeet	762	3 962	0	0	4 724
Laitteet	0	25 764	0	0	25 764
Alv	0	0	0	0	0
Yhteensä	650 752	494 818	489 389	303 517	1 938 475
MMM osuus	438 700	338 800	340 400	151 758	1 269 658
Viraston osuus	212 052	156 018	148 989	151 758	668 816
Kokonaisrahoitus	650 752	494 818	489 389	303 516	1 938 474
MMM osuus budjetissa	438 700	338 800	340 400	168 800	1 286 700
Budjetista käytetty %	100	100	100	90	99

2.4. Raportointi, julkaisut ja seuranta

Hankkeen tieteelliset julkaisut:

1. Liu, Z., Hakala, T., Hyyppä, J., Kukko, A., Kaartinen, H., Chen, R. (2024). Data-Driven Antenna Delay Calibration for UWB Devices for Network Positioning. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 73: 1-11, Art no. 9504211, <https://doi.org/10.1109/TIM.2023.3348891>
2. Faitli, T., Hyyppä, E., Hyyti, H., Hakala, T., Kaartinen, H., Kukko, A., Muhojoki, J., Hyyppä, J. (2024). Integration of a Mobile Laser Scanning System with a Forest Harvester for Accurate Localization and Tree Stem Measurements. *Remote Sensing*, 16(17), 3292. <https://doi.org/10.3390/rs16173292>
3. Sagar, A., Kärhä, K., Einola, K., Koivusalo, A. (2024). Assessing the Potential of Onboard LiDAR-Based Application to Detect the Quality of Tree Stems in Cut-to-Length (CTL) Harvesting Operations. *Forests*, 15(5), 818. <https://doi.org/10.3390/f15050818>
4. Vähä-Konka, V., Korhonen, L., Kärhä, K., Maltamo, M. (2024). Estimating the accuracy of smartphone app-based removal estimates against actual wood-harvesting data from clear cuttings. *iForest* 17:140–147. <https://doi.org/10.3832/ifor4377-017>
5. Liu, Z., Kaartinen, H., Hakala, T., Hyyppä, J., Kukko, A., Chen, R. (2024). Tracking foresters and mapping tree stem locations with decimeter-level accuracy under forest canopies using UWB. *Expert Systems with Applications*, 125519. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.125519>
6. Korhonen, L., Kärhä, K., Maltamo, M., Malinen, J., Hyyppä, J., Kaartinen, H., Toivonen, J., Packalén, P., Koivula, M. (2024). Kaukokartoitus ja metsäkoneiden sensorit metsien monimuotoisuusindikaattorien seurannassa. *Metsätieteen aikakauskirja* 2024, 23010. <https://doi.org/10.14214/ma.23010>
7. Liu, Z., Kaartinen, H., Hakala, T., Hyyti, H., Hyyppä, J., Kukko, A., Chen, R. (2025) Performance analysis of ultra-wideband positioning for measuring tree positions in boreal forest plots, *ISPRS Open Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, Volume 15, 2025, 100087, ISSN 2667-3932, <https://doi.org/10.1016/j.ophoto.2025.100087>.
8. Pohjala, J., Kankare, V., Hyyppä, J., Kärhä, K. (2025). Effects of a mobile LiDAR-based thinning density assistant (TDA) system on harvester operator performance. *Eur J For Res.* <https://doi.org/10.1007/s10342-025-01808-y>
9. Vähä-Konka, V., Korhonen, L., Kärhä, K., Maltamo, M. (2025). Estimating timber assortment reduction and sawlog proportions with the application of harvester measurements and open big geodata. *Trees, Forests and People* 20, 100811, <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2025.100811>.
10. Kafle, B., Kankare, V., Kaartinen, H., Väättä, K., Hyyti, H., Faitli, T., Hyyppä, J., Kukko, A., Kärhä, K. (2025). Assessing the consistency of low vegetation characteristics estimated using harvester, handheld, and drone light detection and ranging (LiDAR) systems. *Silva Fennica* 59(2), 25013. <https://doi.org/10.14214/sf.25013>

11. Liu, Z., Kaartinen, H., Hakala, T., Hyyti, H., Kukko, A., Hyypä, J., Chen, R. (2025). Comparative Analysis of Ultra-Wideband and Mobile Laser Scanning Systems for Mapping Forest Trees under A Forest Canopy. *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, X-G-2025, 551–557, <https://doi.org/10.5194/isprs-annals-X-G-2025-551-2025>
12. Faitli, T., Hyyti, H., Hyypä, J., Kukko, A., Kaartinen, H. (2025). A generic multi-lidar data batching strategy on the sensor driver level, *Int. Arch. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, XLVIII-1/W4-2025, 37–42, <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLVIII-1-W4-2025-37-2025>
13. Liu, Z., Kaartinen, H., Hakala, T., Hyyti, H., Hyypä, J., Kukko, A., Chen, R., Vastaranta, M. (2025). Ultra-Wideband-Based Method for Measuring Tree Positions With Decimeter-Level Accuracy Under a Forest Canopy. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 18, pp. 12961-12972, 2025, <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2025.3569958>
14. Sagar, A., Kärhä, K., Järvelin, K., Ghabcheloo, R. (2025). Evaluation of Simulation Framework for Detecting the Quality of Forest Tree Stems. *Forests* 16(6), 1023. <https://doi.org/10.3390/f16061023>
15. Kymäläinen, H. 2025. Well-being and productivity of forest machine operators – ergonomic support measures. *Dissertationes Forestales* 370. <https://doi.org/10.14214/df.370>
16. Vähä-Konka, V. 2025. Improving and validating forest inventory information using operational harvester data. *Dissertationes Forestales* 376. <https://doi.org/10.14214/df.376>
17. Lopatin, E., Väättäin, K., Holmström, E., Kaartinen, H., Hyyti, H., Sikanen, L., Nuutinen, Y., Acuna, M. (2025). Integrating Pre-Harvest UAV Scans to Enhance Harvester Tree Localization Accuracy. Hyväksytty julkaistavaksi *ISPRS Annals*, UAV-g workshop, Espoo, Finland.
18. Faitli, T. et al. (2025). Dual-LiDAR and inertial-based efficient and robust SLAM for forest harvester. *SilviLaser 2025 conference*, 29.9.-3.10.2025, Quebec, Canada.
19. Satheesan, A. et al. (2025). Tree stem quality detection for Forest CTL machine operator assistance using LiDAR scans. *SilviLaser 2025 conference*, 29.9.-3.10.2025, Quebec, Canada.
20. Kafle, B., Kankare, V., Kaartinen, H., Väättäin, K., Hyyti, H., Faitli, T., Koivumäki, N., Hyypä, J., Kukko, A., Kärhä, K. Assessment of boreal forest structural diversity using harvester, handheld, and drone light detection and ranging (LiDAR) systems. *Arviointiprosessi käynnissä*.
21. Sagar, A., Pohjala, J., Muhojoki, J., Dhital, A., Kaartinen, H., Kärhä, K., Järvelin, K., Ghabcheloo, R., Hyypä, J., Kankare, V. Utilising Mobile Laser Scanning Point Clouds to Assess Harvesting Quality in Thinning Stands. *Käsikirjoitus lähetetty* 2.10.2025.
22. García-Pascual, B., Martín-Cortés, C., Zhou, X., Lopatin, E., Acuna, M. & Kärhä, K. 2025. Tree stem diameter estimation using inexpensive UAV photogrammetric data and Monte Carlo methods. *ISPRS Annals*, Manuscript submitted.
23. Holmström, E., Lopatin, E., Väättäin, K., Kaartinen, H., Hyyti, H., Koivusalo, A., Backas, J., Acuna, M., Garcia Pascual, B., Pohjala, J., Kymäläinen, H., Kärhä, K., Routa, J., Sikanen, L. Real-time monitoring of thinning intensity using harvester data and a LiDAR-based tree map: The R-TIM concept and a case study in Finland. *Käsikirjoitus valmisteilla*.

Muut tieteelliset julkaisut, esim. konferenssijulkaisuissa:

1. Pohjala, J., Kankare, V., Hyyppä, J. & Kärhä, K. 2025. Benefits and Challenges for Harvester Operators Using a Mobile Laser Scanner-Based Guiding System. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 96. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>
2. Sagar, A., Kärhä, K. & Järvelin, K. 2025. Evaluation of simulation framework for detecting the quality of forest tree stems. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 141. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>
3. García-Pascual, B., Acuna, M., Kärhä, K., Väättäinen, K., Lopatin, E. & Martín-Cortés, C. 2025. Optimizing tree selection and harvesting route for thinning operations. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 206. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>
4. Vähä-Konka, V., Korhonen, L., Kärhä, K. & Maltamo, M. 2025. Estimating timber assortment reduction and sawlog proportions with the application of harvester measurements and open big geodata. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 220. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>
5. Sagar, A., Pohjala, J., Kankare, V., Kärhä, K. & Hyyppä, J. 2025. Utilizing mobile LiDAR Point Clouds to Monitor Harvesting Quality in Thinning Stands. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 223. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>
6. Kafle, B., Kankare, V., Kaartinen, H., Väättäinen, K., Hyyti, H., Faitli, T., Hyyppä, J., Kukko, A. & Kärhä, K. 2025. Assessing the consistency of low vegetation characteristics estimated using harvester, handheld, and drone light detection and ranging (LiDAR) systems. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 258–259. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>

7. Ylä-Pöntinen, J., Tarvainen, R., Ovaskainen, H., Riekk, K., Kärhä, K. & Malinen, J. 2025. Positioning Accuracy of Felled Trees Determined by Precision GNSS on a Harvester. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 334. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>
8. Sagar, A., Pohjala, J., Kärhä, K., Muhojoki, J., Hyypä, J. & Kankare, V. 2025. Mobililaserkeilaus harvennushakkuiden korjuujäljen tarkastuksissa. In: Metsien kerroksellisuus, Metsätieteiden päivä 21.10.2025, Tiivistelmäkirja.
9. Lopatin, E. 2025. Advancing Precision Forestry for Optimized Growth, Carbon Sequestration, and Biodiversity Conservation. In: Pesonen, J., Sivén, J., Kanzian, C. & Kärhä, K. (Eds) Book of Abstracts: Proceedings of the 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply. Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 9/2025: 211. <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-61-5640-8>

Blogeja ja esityksiä:

1. Kärhä, K., Malinen, J., Hyypä, J. & Kaartinen, H. 2023. Teknologian mahdollisuudet monimuotoisuuden mittauksessa puunkorjuussa. Metsäteollisuus ry, Blogi 31.5.2023. <https://metsateollisuus.fi/uutishuone/teknologian-mahdollisuudet-monimuotoisuuden-mittauksessa-puunkorjuussa/>
2. Kärhä, K., Malinen, J., Hyypä, J. & Kaartinen, H. 2023. Technological opportunities in measuring biodiversity during harvesting. Metsäteollisuus ry, Blogi 31.5.2023. <https://metsateollisuus.fi/en/uutishuone/technological-opportunities-in-measuring-biodiversity-during-harvesting/>
3. Vähä-Konka, V., Korhonen, L., Kärhä, K. & Maltamo M. 2023. Estimating the accuracy of smartphone app-based removals against actual wood harvesting data from clear cuttings. IBFRA 2023 Conference, Climate Resilient and Sustainable Forest Management, August 28-31, 2023, Helsinki, Finland.
4. Kärhä, K. & Hyypä, J. 2023. Metsäluonnon monimuotoisuuden mittaaminen metsäkoneilla. Esitelmä, Metsäpäivät 2023, Hotelli Clarion Helsinki, 26.10.2023.
5. 23.2.2024 esitys UNITE-lippulaivan Vaikuttavuuskumppaneiden ydinryhmän kokouksessa "Metsäkonepaikannus ja uudet sensorit"
6. MML:n uutiset 13.3.2024: Älyharvesteri ohjaa metsäkoneenkuljettajaa ilmastokestävään metsänhoitoon <https://www.maanmittauslaitos.fi/ajankohtaista/alyharvesteri-ohjaa-metsakoneenkuljettajaa-ilmastokestavaan-metsanhoitoon>
7. 17.4.2024 esitys UNITE-lippulaivan Scientific Advisory Board -kokouksessa "Sensors for forest machine localization and forest inventory"
8. Kärhä, K., Malinen, J., Hyypä, J. & Kaartinen, H. 2024. Mittaus hakkuukoneesta. Kohti monimuotoisempia metsiä – Kattava ja kohdennettu metsätieto avain onnistumiseen – Metsäteollisuus ry:n ja Sahateollisuus ry:n Monimuotoisuusseminaari, 19.4.2024, Itä-Suomen yliopisto, Carelia-sali, Joensuu.

9. Hyypä, J. 2025. Keynote: High-quality forest resource information through individual tree level inventories, automated field reference and accurate tree species classification. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
10. Pohjala, J., Kankare, V., Hyypä, J. & Kärhä, K. 2025. Benefits and Challenges for Harvester Operators Using a Mobile Laser Scanner-Based Guiding System. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
11. Sagar, A., Kärhä, K. & Järvelin, K. 2025. Evaluation of simulation framework for detecting the quality of forest tree stems. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
12. García-Pascual, B., Acuna, M., Kärhä, K., Väättä, K., Lopatin, E. & Martín-Cortés, C. 2025. Optimizing tree selection and harvesting route for thinning operations. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
13. Vähä-Konka, V., Korhonen, L., Kärhä, K. & Maltamo, M. 2025. Estimating timber assortment reduction and sawlog proportions with the application of harvester measurements and open big geodata. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
14. Sagar, A., Pohjala, J., Kankare, V., Kärhä, K. & Hyypä, J. 2025. Utilizing mobile LiDAR Point Clouds to Monitor Harvesting Quality in Thinning Stands. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
15. Kafle, B., Kankare, V., Kaartinen, H., Väättä, K., Hyyti, H., Faitli, T., Hyypä, J., Kukko, A. & Kärhä, K. 2025. Assessing the consistency of low vegetation characteristics estimated using harvester, handheld, and drone light detection and ranging (LiDAR) systems. 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
16. Ylä-Pöntinen, J., Tarvainen, R., Ovaskainen, H., Rieki, K., Kärhä, K. & Malinen, J. 2025. Positioning Accuracy of Felled Trees Determined by Precision GNSS on a Harvester. Poster presentation, 57th International Symposium of Forest Mechanization (FORMEC 2025), Harnessing novel technologies to execute sustainable and low-carbon wood supply, June 9–13, 2025, Joensuu, Finland.
17. Kafle B. 2025. Potential of mobile laser scanning (MLS)-equipped harvester for measuring and monitoring forest biodiversity indicators during harvesting operations. Poster presentation, Interdisciplinary summer school on precision forestry using LiDAR technology, 30 June - 4 July 2025, Warsaw, Poland.
18. Lopatin, E., ym. Integrating Pre-Harvest UAV Scans to Enhance Harvester Tree Localization Accuracy. Esitelmä, UAV-g workshop 2025, Dipoli, Espoo, 12.9.2025.
19. Faitli, T. ym. Dual-LiDAR and inertial-based efficient and robust SLAM for forest harvester. Esitelmä, SilviLaser 2025 conference, Quebec, Kanada, 3.10.2025.

20. Satheesan, A. ym. Tree stem quality detection for Forest CTL machine operator assistance using LiDAR scans. SilviLaser 2025 conference, Quebec, Kanada, 3.10.2025.
21. Kärhä, K. 2025. Koneautomaation mahdollisuudet ja haasteet puunkorjuussa. Puunvuoro-lehti, Puheenvuoro 15.10.2025.
<https://puunvuoro.fi/puheenvuoro/koneautomaation-mahdollisuudet-ja-haasteet-puunkorjuussa/>
22. Sagar, A., Pohjala, J., Kärhä, K., Muhojoki, J., Hyypä, J. & Kankare, V. 2025. Mobiililaserkeilaus harvennushakkuiden korjuujäljen tarkastuksissa. Metsien kerroksellisuus, Metsätieteiden päivä 2015, Helsingin yliopisto, Viikki, 21.10.2025.
23. Kärhä, K. & Hyyti, H. 2025. Metsäkonetiedon ja -sensoreiden tiekartta 2035. Esitys Metsäpäivät 2025, Finlandia-talo, 23.10.2025.
24. Hyyti, H. & Kankare, V. 2025. Yksinpuintulkinnan mahdollisuudet metsäalalla – missä mennään? Esitys Metsäpäivät 2025, Finlandia-talo, 23.10.2025.
25. Kaartinen, H ym. IlmoStar-hankkeen loppuwebinaari ja Metsäkonetiedon ja -sensoreiden tiekartta 2035 julkistus. Webinaari 18.11.2025

Kirjoitetut artikkelit alan lehtiin:

1. Kärhä, K., Pohjala, J., Kankare, V., Hyypä, J. 2023. Kohti parempaa korjuujälkeä harvennuksilla. Metsäalan Ammattilehti 38(Kesä): 12–13.
2. Kärhä, K., Kaartinen, H., Hyyti, H. 2025. Miksi metsää kaadetaan naapurin tiluksilta? Metsälehti 12.9.2025: 16–17.

Evon koetyöhön 1.10.2024 lähetettiin mediakutsu. Sen ja vierailujen perusteella julkaistiin ainakin seuraavat artikkelit:

1. Metsälehti 18/2024
<https://www.metsalehti.fi/artikkelit/alyharvesteri-opastaa-kuljettajaa>
2. Metsälehti 19/2024
<https://www.metsalehti.fi/lehti/artikkeli/ylakerta-satelliitit-eivat-yksin-riita-metsakoneen-etavalvontaan>
3. Hämeen Sanomat: Evolla testattu älyharvesteri säästäisi luontoa ja vähentäisi virheitä – Tutkimus tähtää tarkkaa sijaintitietoa hyödyntävään metsäkoneeseen
<https://www.hameensanomat.fi/paikalliset/7944666>
4. Keski-Häme: Evolla testattiin uusia paikannusmenetelmiä hakkuukoneessa
<https://www.keski-hame.fi/paikalliset/7956011>
5. Iisalmen Sanomat: Älyharvesteri säästäisi luontoa ja vähentäisi virheitä - Ponsse tarjoaa metsäkoneissaan tutkimuslaitteille alustan
<https://www.iisalmensanomat.fi/paikalliset/7958392>
6. MetsäTrans: Älykästä metsäkonetta testataan Evolla Hämeenlinnassa 1.10.
7. Forssan lehti: Älyharvesteri säästäisi luontoa ja vähentäisi virheitä - Tutkimus tähtää tarkkaa sijaintitietoa hyödyntävään metsäkoneeseen.

2.5. Toteutusvaiheen arviointi

Hankkeen toteutus sujui hyvässä yhteistyössä hankepartnereiden kesken, kuten myös ohjausryhmän kanssa. Ohjausryhmän kommentit otettiin huomioon mm. toisen

koetyökohteen valinnassa. Kenttätöissä koettiin joitain teknisiä ongelmia, mutta ei mitään vakavaa, mikä olisi vaarantanut koetöille asetetut tavoitteet. Testeissä oli käytössä useita rinnakkaisia järjestelmiä, esimerkiksi erityyppisiä laserkeilaimia, ja kerätyt datamäärät olivat todella suuria. Kaikkia aineistoja ei ehditty analysoida hankkeen aikana, ja koska jo aiemmat koekohteet edustivat varsin kattavasti erityyppisiä hakkuukohteita ja -menetelmiä, niin kolmatta koko konsortion yhteistä kenttätöitä ei järjestetty. Kerättyjen aineistojen hyödyntäminen jatkuu muissa hankkeissa.

2.6. DNSH-kriteerien toteutuminen

IlmoStar-hanke on tukenut vahvasti Suomen kestävän kasvun ohjelman tavoitteita sekä DNSH-periaatteiden noudattamista metsätaloudessa.

Ilmastonmuutoksen hillitseminen

Hanke tulokset edistävät merkittävästi ympäristötavoitetta pyrkimällä hillitsemään ja torjumaan ilmastonmuutosta. Tästä hyvä esimerkki on hankkeessa testattu mobiililaserkeilaukseen perustuva metsäkoneenkuljettajaa opastava ja avustava järjestelmä, joka tukee metsäkoneenkuljettajaa hänen jokapäiväisessä työssään ja joka parantaa työn tuottavuutta ja laatua, kun metsäkoneen sensorijärjestelmä ja siihen integroitu metsäkoneen tekoäly esimerkiksi ehdottaa hakkuukoneen kuljettajalle, mitkä puut voisivat olla kaadettavat puut tai toisaalta informoi kuormatraktorin kuljettajalle tarkat sijainnit pölkkykasoista puutavaralajeittain ajouranvarsilla. Pölkkykasojen tarkka sijaintitieto mahdollistaa niiden keruuseen kuluvan ajan ja ajamisen optimoinnin. Yhteenvetona: kun tuottavuus (m³/tunti) puunkorjuussa kasvaa metsäkoneenkuljettajaa avustettaessa, merkitsee tämä pienempää metsäkoneiden polttoaineen kulutusta (litraa/m³), mikä edelleen merkitsee entistä matalampia kasvihuonekaasupäästöjä (esim. kg CO₂/m³) sekä parempaa energiatehokkuutta puunkorjuussa.

Ilmastonmuutokseen sopeutuminen

Hanke edistää merkittävästi puunhankinnan sopeutumista ilmastonmuutokseen. Meillä on oltava tarkka tieto puustosta ja sen sitomasta hiilestä, mitä voimme hyödyntää, kun sopeutamme puunhankintaoperaatioitamme ilmastonmuutokseen ja kun käymme ilmastokeskusteluja ja -neuvotteluja eri areenoilla faktatietoon perustuen. Hankkeessa testatulla ja pilotoidulla sensorijärjestelmällä voidaan tuottaa hakkuun yhteydessä tarkka puukartta kasvamaan jätetystä puustosta (eli puiden ominais- ja sijaintitiedot: esim. puulaji, rinnankorkeusläpimitta, pituus, oksaisuus, pituusboniteetti, koordinaatit). Tätä puukarttaa voidaan käyttää, kun suunnitellaan seuraavia hakkuuta sekä niiden ajoitusta ja toteutusta tai kun lasketaan tarkasti, paljonko metsikön puihin on sitoutunut hiiltä tai paljonko metsikön puut sitovat hiiltä kasvaessaan. Kaikki tämä auttaa sopeuttamaan puunhankinnan paremmin ilmastonmuutokseen. Lisäksi meillä on erittäin tarkka tieto meidän metsiemme hiilivarannosta ja sen kasvusta, kun käymme ilmastokeskustelua ja -neuvotteluja sekä kansallisesti että kansainvälisesti.

Vesivarojen ja merten luonnonvarojen kestävä käyttö ja suojele

Hanke edistää merkittävästi vesivarojen suojelua. Metsäluonnon monimuotoisuuden suojele – esimerkiksi vesistöjen ja pienvesien suojakaistavyöhykkeiden jättäminen hakkuussa – on nyt ja erityisesti tulevaisuudessa erittäin tärkeässä roolissa puunhankinnassa. Hankkeessa testatuilla ja pilotoiduilla sensorijärjestelmillä voidaan myös varmistaa, että hakkuussa

jätetään suositusten mukaiset vesistöjen ja pienvesien suojakaistavyöhykkeet. Lisäksi ne voidaan todentaa automaattisesti ja tarkasti seuraavia toimenpiteitä sekä puunkorjuuoperaatioista tehtävää loppuraportointia varten. Puunkorjuun loppuraportointi voi pitää sisällään raportin metsäluonnon monimuotoisuuden suojelusta sekä puunkorjuun korjuujäljestä, jonka puunkorjuuyrittäjä voi toimittaa metsänomistajalle, toimeksiantajalle (esim. puunhankintaorganisaatio) ja viranomaisille.

Kiertotalous, mukaan lukien jätteen synnyn ehkäisy ja kierrätys

Hanke edisti kiertotaloutta etsimällä toteutustapoja, joilla tarkkuuspaikannus ja mittausjärjestelmä olisi jälkiasennettavissa iäkkäämpään, käytössä olevaan puunkorjuukalustoon, mikä pidentää olemassa olevan metsäkonekaluston teknistä käyttöikää.

Ympäristön pilaantumisen ehkäiseminen ja vähentäminen

Hankkeella ei ollut vaikutusta tähän ympäristötavoitteeseen, mutta hankkeessa testattavalla ja pilotoitavalla sensorijärjestelmällä puunkorjuuoperaatiot voidaan toteuttaa ja dokumentoida erittäin paikkatarkasti. Tarkalla paikkatiedolla voidaan esimerkiksi välttää vahingossa hakkaamasta metsälain 10 §:n tarkoittamia erityisen tärkeitä elinympäristöjä.

Biologisen monimuotoisuuden ja ekosysteemien suojelu ja ennallistaminen

Hanke edistää merkittävästi tätä ympäristötavoitetta. Hankkeessa testatulla ja pilotoidulla sensorijärjestelmällä voidaan ohjeistaa ja muistuttaa hakkuukoneen kuljettajaa jättämään säästöpuuryhmiä, lahopuuta ja riistatiheiköitä sekä tekemään tekopökölöitä hakkuussa tai esimerkiksi varoittaa metsäkoneenkuljettajaa ajamasta maalahopuiden ylitse puunkorjuussa. Hankkeessa testatulla ja pilotoidulla sensorijärjestelmällä voidaan myös todentaa, että puunkorjuussa edellä mainitut metsäluonnon monimuotoisuuden kannalta tärkeät toimenpiteet on toteutettu suositusten mukaisesti ja hyvin. Testatulla ja pilotoidulla sensorijärjestelmällä automaattisesti tuotettu puunkorjuun loppuraportti – sisältäen tarkan paikkatiedon korjuun toteutuksesta – voidaan toimittaa metsänomistajalle ja viranomaisille.

3. Tulokset ja niiden arviointi

3.1. Tulosten esittely

Metsäkoneen ja hakkuulaitteen paikannustarkkuuden parantaminen

Satelliittipaikannuksen tarkkuus heikkenee metsässä merkittävästi latvusten aiheuttaman signaalin heikkenemisen takia. Tarkinta reaaliaikaista paikannusta varten tarvitaan korjausdataa, joka välitetään paikantimelle dataverkon kautta. Verkon katvealueilla korjausdatan saanti ei onnistu. Tarvitaan siis satelliittipaikannusta tukevia tai korvaavia menetelmiä, että päästään täsmämetsätaloudessa vaadittavaan noin 50 cm tai parempaan paikannustarkkuuteen latvuspeiton alla.

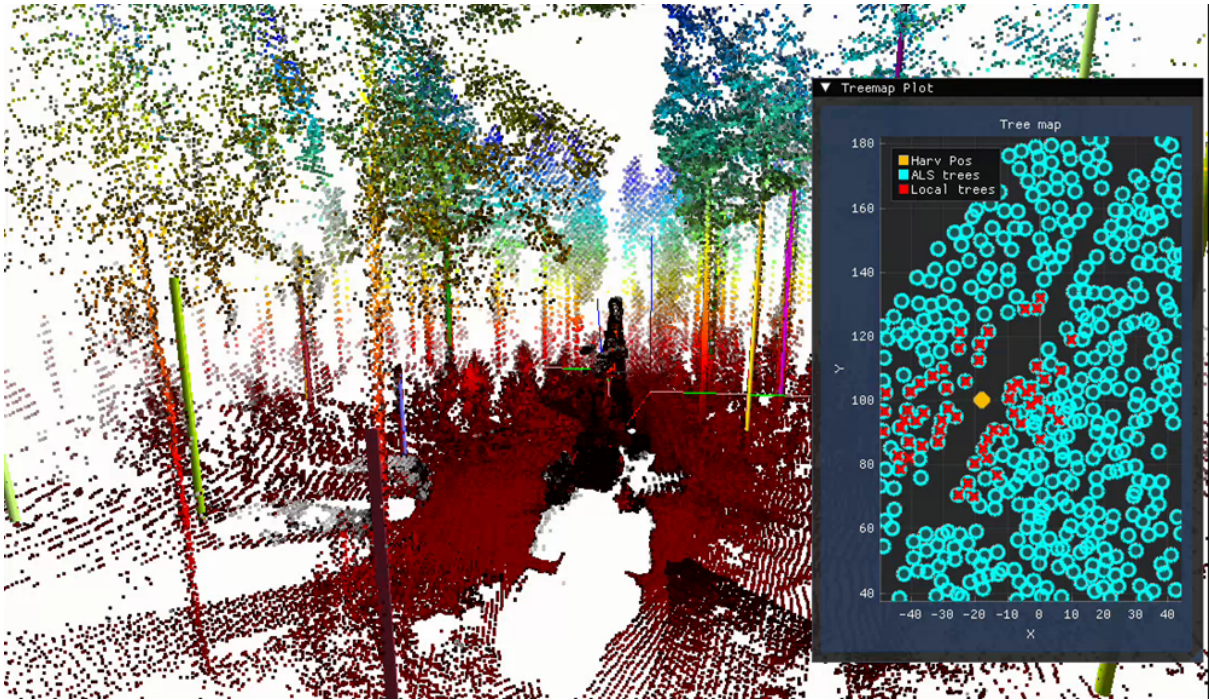
Edellä mainittu dataverkon saatavuusongelmaan yhtenä ratkaisuna voisi olla Galileo HAS (High Accuracy Service), jossa Galileo-satelliittipaikannusjärjestelmän reaaliaikainen

korjausdata tulee paikantimelle satelliittisignaalin mukana. Hyvissä olosuhteissa HAS-paikannuksella on päästy noin 20-23 cm paikannustarkkuuteen. HAS-paikannusta testattiin hankkeen koetyössä syksyllä 2024, mutta tulosten mukaan paikannustarkkuus ei parantunut merkittävästi, vaan paikannusvirheet olivat edelleen metriluokkaa, kun toimittiin latvuspeiton alla.

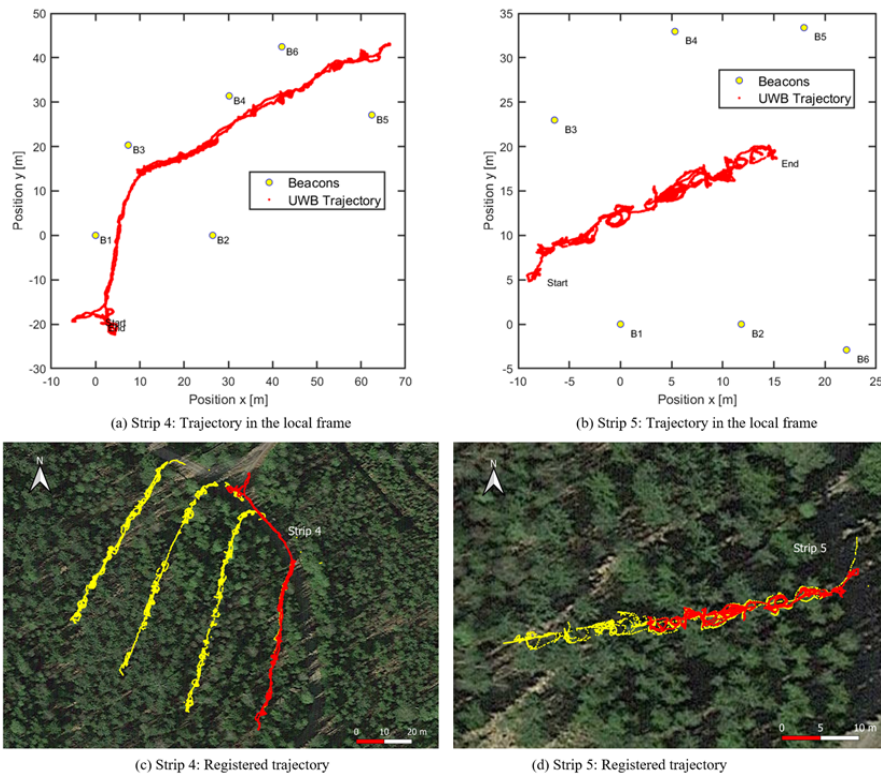
Hankkeessa kehitettiin myös metsäkoneeseen asennettujen laserkeilaimien mittaaman datan käyttöä metsäkoneen paikannukseen. SLAM-menetelmässä (Simultaneous Localization and Mapping) koneen liikkeitä seurataan havaitsemalla ympäristön piirteitä (esim. puun runkoja) mitatusta datasta, ja näin voidaan määrittää koneen sijainnin ja asennon muutokset. Tulosten mukaan SLAM-ratkaisulla päästään parhaimmillaan noin 20 cm paikannustarkkuuteen. Jos käytössä on ennakkotietona puukartta, niin puiden tunnistus ja koneen paikannus suhteessa niihin on mahdollista toteuttaa reaaliajassa (kuva 2). Koetyö 2023 oli helppossa ympäristössä, jossa paikannus onnistui luotettavasti ja reaaliaikaisesti SLAM menetelmällä, mutta koetyössä 2024 jossa toimittiin tiheässä ennakkoraivaamattomassa ensiharvennuskohteessa, SLAM:iin perustuvan paikannuksen tarkkuus oli selvästi heikompi. Lisää tutkimusta tarvitaan jotta paikannus saadaan toimimaan luotettavasti myös haastavissa tiheissä nuorissa metsissä. Hankkeessa kehitettiin menetelmää myös laserkeilausdatan käyttöön koneen osien asennon ja paikan määrittämiseen, erityisen kiinnostuksen kohteena on hakkuulaitteen tarkka seuranta. Menetelmä saatiin toimivaksi, mutta lisää kehitystyötä tarvitaan vielä erityisesti seurannan reaaliaikatoteutukseksi.

Droonipohjaisen Lidar-datan avulla tuotetut puiden paikat ja niiden käyttö hakkuukoneen puomin kärjen paikannuksen korjauksessa osoittautui myös lupaavaksi. Hakkuukoneen poistamien puiden kantojen paikannustarkkuus parani 50%:lla, kun Lidar-pohjainen korjaus toteutettiin hakkuukoneen tuottamiin paikannuksiin. Evon 2024 ensiharvennuskohteella hakkuukoneen puomin pään keskivirhe (RMSE) oli 1,6 metriä, kun taas UAV-korjattu keskivirhe oli 0,8 metriä.

Hankkeessa kehitettiin lisäksi satelliittipaikannuksen tyyliä toimivaa radiomajakkapaikannusta (Ultra Wideband, UWB), missä käytetään metsään sijoitettavia radiomajakoita, joiden lähettämiä signaaleja havaitaan liikkuvalla vastaanottimella. Hankkeen koetöissä saavutettiin parempi kuin 30 cm paikannustarkkuus suhteessa harvesterin toiminta-alueen ympärille sijoitettuihin radiomajakoihin (kuva 3).



Kuva 2. Metsäkoneeseen asennetun laserkeilausjärjestelmän käyttö koneen paikan ja puiden tunnistamiseen. Isossa kuvassa on esitetty järjestelmän keräämää pistepilvidataa, ja pienessä kuvassa oikealla näkyy sinisellä ennakkotietona alueen puukartta, punaisella järjestelmän tunnistamat puut ja keltaisella koneen paikka. Tämä laskenta on toteutettavissa reaaliaikaisena. (Kuva: T. Faitli 2025)

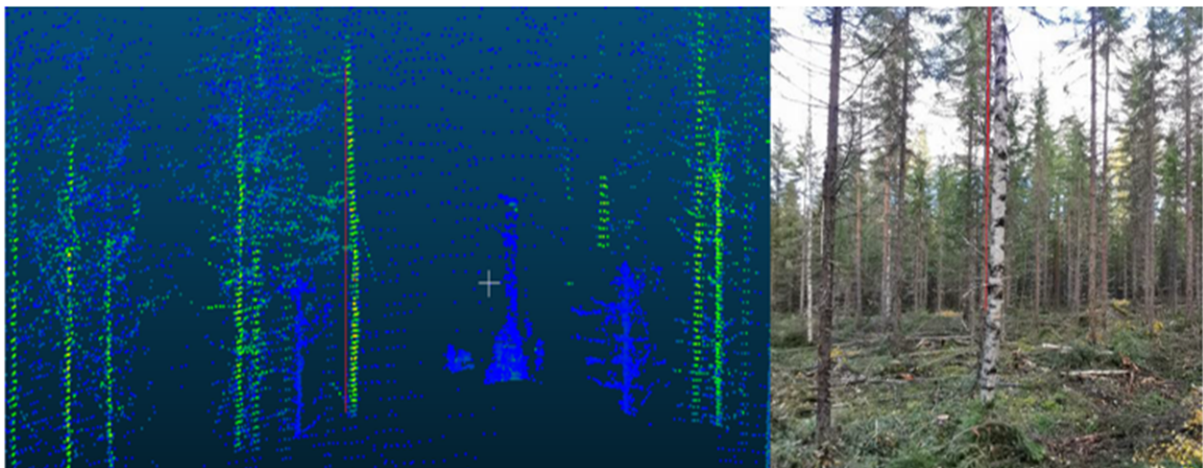


Kuva 3. Koetyössä ajourien ympärille asetettiin kuusi radiomajakkaa (B1-6) ja vastaanotin oli harvesterin katolla. Kuvissa punaisella näkyy UWB-paikannuksen tallentama harvesterin kulkureitti ja keilaisella robottitakymetrillä mitattu kulkureitti. (Kuva: Z. Liu ym. 2025.)

Sensoridatan käyttö puiden, niiden ominaisuuksien ja puuvalinnan määrittämiseen

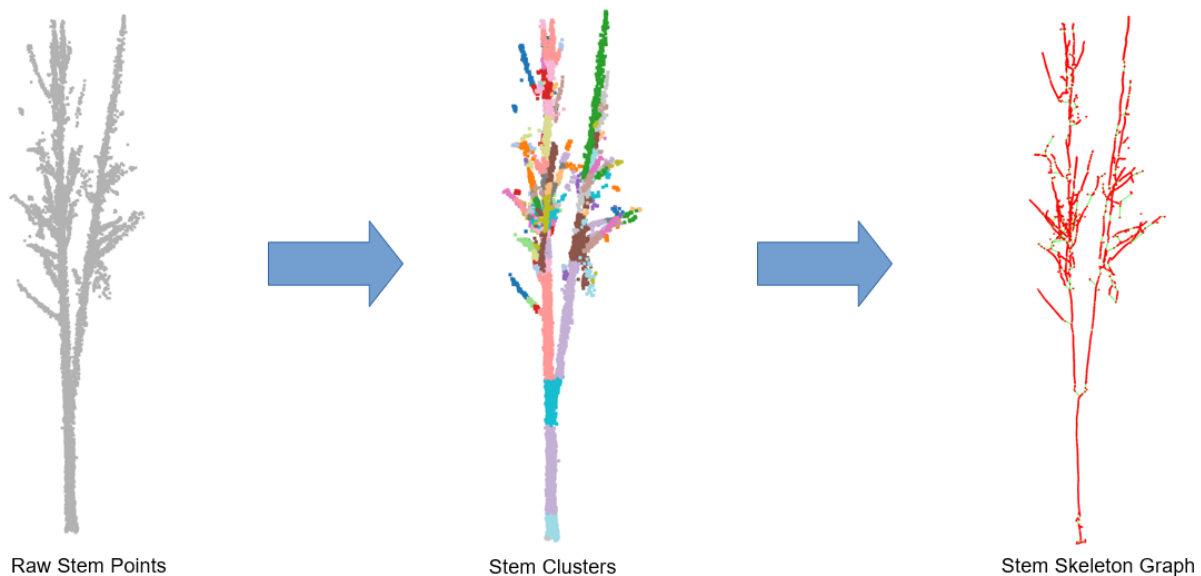
Hankkeessa kehitettiin menetelmiä puiden ja niiden ominaisuuksien tunnistamiseen metsäkoneeseen asennetun laserkeilausjärjestelmän keräämästä aineistosta. Kuten edellä on kuvattu, puiden tunnistamisessa ja kartalle sovittamisessa päästään jo reaaliaikaratkaisuun. Hankkeessa kehitettiin uusia algoritmeja puiden rakennepoikkeamien tai vaurioiden tunnistamiseen, mikä on tärkeää puiden valinnan ohjauksessa harvennustyömailla. Luonnonvarakeskuksessa kehitettiin menetelmä reaaliaikaiseen harvennustiheyden arviointiin (R-TIM, Realtime monitoring of thinning intensity) ennakkotiedon (puukartta) ja metsäkonetiedon (hakkuulaitteen paikannus) perusteella. Oikeilla valinnoilla voidaan optimoida harvennushakkuu hiilensidonnan maksimoimiseksi ja tukea biodiversiteettiä esimerkiksi säästöpuuryhmien ja tekopökkelöiden sijoittamisessa.

Puiden rakennepoikkeamien tunnistamista tutkittiin sekä simuloidussa ympäristössä että oikeissa metsissä. Yhtenä tutkimuskohteena oli lenkouden puun tunnistaminen (kuva 4), joka on ihmissilmälle vaikeammin erotettava kuin esimerkiksi kaksihaaraisuus, erityisesti, jos puu kaartuu hakkuukonetta kohti. Lenkoudella tarkoitetaan puun suoruuden poikkeamaa (esim. suoruuden poikkeama 10 mm metrin pituisella matkalla).



Kuva 4. Lenkon puun tunnistaminen pistepilvestä oli yksi tutkituista rakennepoikkeamatyypeistä. Punainen pystyviiva on asetettu kohtisuoraan maatasoa vasten. Vasemman kuvan pistepilvi ja oikean valokuva ovat eri metsistä.

Hankkeessa tutkittiin myös poikkeavien runkorakenteiden tunnistamista tiheästä ilmalaserkeilausaineistosta, jolloin poikkeamat saataisiin ennakkotietona metsäkoneelle. Kuvassa 5 on esimerkki droonilla kerätystä pistepilvestä, josta puun haaraisuus tunnistetaan segmentoimalla puun 3D-pisteet niiden lähinaapuruston perusteella, ja kullekin segmentille määritetään vektori, jotka sitten kuvaavat puun rungon rakenteen.



Kuva 5. Tiheästä droonilla kerätystä pistepilvestä segmentoidut runkoklusterit ja niiden perusteella määritetty puun runkorakenne. (Kuva: A. Satheesan 2025)

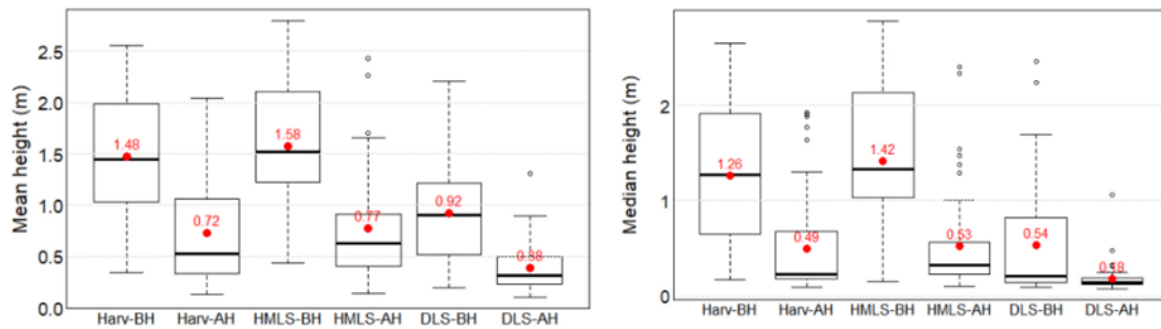
Pohjapinta-alaan perustuva harvennus on yleisesti käytössä oleva harvennustapa, mutta erittäin vaikea toteuttaa tarkasti erityisesti kokemattomalle hakkuukoneen kuljettajalle. Hankkeessa tutkittiin menetelmiä, joilla hieman harvemmasta tai huonolaatuisesta laserkeilaimen pistepilvestä saadaan arvioitua tarkemmin ja luotettavammin puiden rinnankorkeusläpimittaa (DBH). Tämä mahdollistaisi tulevaisuudessa reaaliaikaisen DBH-mittauksen ja ohjeistuksen kuljettajalle, mikä helpottaisi merkittävästi hakkuun toteuttamista ohjeistuksen mukaan, ja antaisi kuljettajalle varmuuden korjuutyön laadusta.

Kehitetty menetelmä hyödynsi tekoälyä, jota koulutettiin saman alueen puuston kokonaispistepilvellä. Ensimmäisissä etukäteen tallennetulla todellisella metsädatalla tehdyssä testissä saavutettiin keskimäärin 4,5 cm:n läpimitan virhe, joka käytetyllä aineistolla vastasi noin 16,8 %:a. Mallin kehitys kuitenkin jatkuu muun muassa hyödyntämällä yksittäisten puiden pistepilviä ja hakkuukoneen mittaamaan runkokäyrää. Seuraavan kehitysversion metsätestit kuitenkin ajoittuvat hankkeen jälkeiseen aikaan.

Samanaikaisesti Akatemian ja Maa- ja metsätalousministeriön rahoittamassa UNITE lippulaivassa on tutkittu ja kehitetty merkittävästi drooni- ja monikanavalaserkeilausmenetelmiä sekä aineistojen tulkintamenetelmiä erityisesti puulajitunnistuksen ja kuolleiden sekä kaatuneiden puiden tunnistamiseen. Tämä kehitystyö tukee merkittäväällä tavalla IlmoStar-hankeen visiota ja metsätalouden digitalisaatiota.

Sensoridatan käyttö metsän rakenteen arviointiin

Koetöissä kerättyjä aineistoja käytettiin metsän aluskasvillisuuden ja rakenteellisen monimuotoisuuden määrittämiseen. Näillä on tärkeä rooli metsän biodiversiteetin tukemisessa ja parantamisessa. Tulokset osoittivat, että hakkuukoneeseen asennetulla mobiililaserkeilaimella voidaan tuottaa tarkkaa tietoa metsäluonnon monimuotoisuudesta. Tutkimuksissa verrattiin keskenään hakkuukoneen mobiililaserkeilaimen, reppulaserkeilaimen ja droonissa olevan laserkeilaimen tuottamaa dataa (kuva 6).



Kuva 6. Hakkuukoneeseen liitetyn laserkeilaimen (Har), käsi-/reppulaserkeilaimen (HMLS) ja droonissa (DLS) olleen laserkeilaimen tuottama puunkorjuutyömaalla olleen alikasvon keski- ja mediaanipituus ennen (BH) ja jälkeen (AH) hakkuun. Tulokset osoittavat, että valtapuuston alla kerätty pituustieto on samansuuntaista hakkuukonelaserkeilaimella (Har) ja reppulaserkeilaimella (HMLS) tuotettuna. Tietoa voidaan hyödyntää (riista)tiheiköiden dokumentoinnissa (Kuva: Kافلة ym. 2025).

Metsäkoneenkuljettajien haastattelututkimus

Hankkeessa toteutettiin metsäkoneenkuljettajien haastattelututkimus siitä, mihin he kaipaavat eniten tukea työssään, ja miten esimerkiksi kerätyn sensoridatan ja ennakkotiedon perusteella tuotettu koneenkuljettajaa opastava tieto puuvalinnan ja hakkuurajoitusten suhteen olisi paras heille esittää.

Aineistonkeräämisessä käytettiin puolistrukturoitua haastattelulomaketta ja haastattelut toteutettiin kasvotusten 50 metsäkoneenkuljettajan kanssa. Metsäkoneenkuljettajia haastateltiin kautta maan, jotta saatiin maantieteellisesti mahdollisimman laaja ja kattava otanta. Haastattelut toteutettiin kasvokkain, koska tutkimusaihe liittyy tulevaisuuden visioon ja joidenkin teemojen selittäminen kuljettajille olisi ollut puhelimitse hankalaa. Haastattelutilanteessa kuljettajille esitettiin tekoälyn avulla luotuja havainnekuvia, mikä auttoi heitä ymmärtämään tulevaisuuden visioita.

Puolistrukturoitu haastattelulomake sisälsi avoimia kysymyksiä sekä kaksitasoisia Likert-asteikollisia (asteikko 1–5) kysymyksiä. Aihepiirejä pohjustettiin avoimilla kysymyksillä, minkä jälkeen siirryttiin Likert-asteikollisiin kysymyksiin. Nykypäivää koskeissa kysymyksissä arvioitiin tarpeellisuutta sekä toimivuutta ja tulevaisuuden kysymyksissä tarpeellisuutta sekä vaikutusta omaan työhön. Avoimien kysymyksien avulla pyritään selvittämään vastaajien mielipiteitä tarkemmin ja löytämään vastauksia asteikollisista kysymyksistä ilmaantuneisiin ongelmiin.

Tulosten perusteella kuljettajat kaipaavat teknologian kehityksen tuomia kehitysaskelaita työelämään. Erityisesti nuorille ja kokemattomille kuljettajille tulevaisuuden avustavista järjestelmistä on hyötyä kuljettajauran alkutaipaleella. Tämä ilmenee niin kokeneiden kuin nuortenkin kuljettajien kommenteista. IlmoStar-hankkeen myötä tuotettua tietoa ja tehdyn sensoriteknologian kehitystyön tuloksia tulisi erityisesti suunnata harvennusvoimakkuuden hallintaan, puun ominaisuuksien tunnistamiseen sekä kuljettajien fyysisen ja kognitiivisen ergonomian parantamiseen. Lisäksi kuljettajat pitivät jäävän puuston mittausta tärkeänä avustavana ominaisuutena, mikä vähentää työkuormaa.

Avustavien järjestelmien tieto tulisi edelleen esittää ohjaamossa jo nykyisellään olevia näyttöjä hyödyntäen. Kuljettajat osoittivat kuitenkin valmiutta kokeilla ja arvioida uusia ja vaihtoehtoisia menetelmiä tiedon esittämiseen. Järjestelmiä suunniteltaessa on otettava huomioon niiden kustannukset. Vaikka teknologiset ratkaisut voivat tuoda hyötyjä, niiden käyttöönotto ei ole realistista, jos investointikustannukset ylittävät hyödyt.

Ilmastokestävämmän metsänhoidon tärkeä kehitysaskel on sensoreiden avulla avustaa kuljettajaa toteuttamaan ilmastokestävää ja luonnon monimuotoisuuden huomioonottavaa puunkorjuuta. Luontokohteiden tunnistamisen lisäksi tulisi kehittää yhtenäinen ja kattava järjestelmä, joka mahdollistaa metsäluonnon monimuotoisten elementtien systemaattisen dokumentoinnin ja säilyttämisen tulevia sukupolvia varten.

Tarkemmat tiedot haastattelusta ja sen tuloksista julkaistaan pro gradu -opinnäytetyönä (Valtteri Kinnunen: Metsäkoneenkuljettajan tuen tarve ja avustavat järjestelmät tulevaisuudessa, Itä-Suomen yliopisto).

Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 -visio

Hankkeen työpakettien perusteella tehtiin läpileikkaava synteesi metsäkonetiedon ja -sensoreiden tuloksista, mahdollisuuksista, riskeistä sekä uusista ideoista, minkä pohjalta luotiin Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 -visio, joka julkaistaan omana julkaisunaan 18.11.2025 Publications of the University of Eastern Finland, Reports and Studies in Science, Forestry and Technology 10/2025.

Tiekarttaan laadittiin toteutussuunnitelma, miten laadittu visio voidaan saavuttaa. Tiekartassa esiteltiin teknologiat, jotka voidaan ottaa käyttöön nopeasti, ja toisaalta innovaatiot, jotka vaativat vielä TKI-työtä ennen kuin konsepti on vietävissä operatiiviseen tuotantokäyttöön. Lisäksi tiekartan ratkaisusta ja innovaatioista tehtiin kustannus-hyötyanalyysit.

Metsäkonetiedon ja -sensoreiden Tiekartta 2035 -vision mukaan vuonna 2035 metsävaratieto on nykyistä huomattavasti tarkempaa niin puuston määrän, laadun ja niiden muutosten kuin korjuukelpoisuuden ja maaperätiedonkin suhteen. Tarkka, yksinpuintulkittu metsävaratieto mahdollistaa laadukkaan etukäteistiedon tuottamisen puunhankintaprosessin kustannus- ja energiatehokkaalle, ilmastokestävälle sekä vähähiiliselle suunnittelulle ja toteutukselle. Etukäteistieto pitää sisällään valtakunnallisilla ilmalaserkeilausohjelmilla sekä drooneilla ja muilla ilma-aluksilla ennakkoon kerätyn tiedon puustosta ja maaperästä. Tarkka puusto- ja maaperätieto tukee myös puuston hiilensidonnän muutoksen todentamisessa osana tulevaisuuden hiilikauppajärjestelmää.

Vuonna 2035 tekoälykehitys on tuonut lisää automatisoituja toimintoja puunhankinnan suunnittelujärjestelmiin mahdollistaen puunkorjuukohteiden optimaalisen valinnan sekä korjuun ajoittamisen. Metsän digitaaliset kaksoset mahdollistavat tekoälyoptimoidun metsäkonetyön suunnittelun jo ennakolta huomioiden korjuuolosuhteet ja vuodenajan sekä mahdollistaen optimoidun puunkorjuutyön toteutussuunnitelman (esim. puukartta mukaan lukien suunniteltu poistettava ja jäävä puusto) viennin metsäkoneenkuljettajaa opastaviin ja avustaviin järjestelmiin. Kehittyneillä metsäkonesimulaattoreilla metsäkoneenkuljettajat koulutetaan hyödyntämään koneiden avustavia ja muita järjestelmiä tehokkaasti.

Tarkkuuspaikannus on käytössä kaikissa hakkuukoneissa vuonna 2035. Metsäkonesensorit, jotka perustuvat laser- ja konenäköpohjaisiin teknologioihin ja joilla voidaan rikastaa koneisiin lähetettyä etukäteistietoa, ovat alkaneet yleistyä, mutta eivät ole vielä käytössä kaikissa metsäkoneissa. Etukäteistietoa rikastetaan myös reaaliaikaisesti puunkorjuuoperaation aikana tuotetulla, standardoidulla metsäkonetiedolla.

Metsäkonevalmistajat ovat kehittäneet metsäkoneisiin koneenkuljettajaa opastavia, automatisoituja järjestelmiä, jotka tehostavat kuljettajan työtä, parantavat puunkorjuun laatua ja kohentavat koneenkuljettajan työssäjaksamista. Opastavat järjestelmät helpottavat myös metsäkoneenkuljettajapulaa. Esimerkiksi ajouraverkoston rakentaminen, harvennusvoimakkuuden reaaliaikainen seuranta, huonolaatuisten ja sairaiden puiden tunnistaminen, arvokkaiden puiden säilyttäminen ja kuormatraktorikuormien muodostaminen kuormittain on lähes täysin automatisoitu, eikä vaadi erityistä huomiota koneenkuljettajalta; tältä osin koneenkuljettaja on vain prosessinvalvoja metsäkoneessa.

Vuonna 2035 puunkorjuuoperaatioiden laadusta raportoidaan läpinäkyvästi metsänomistajalle ja viranomaisille, jotka eivät suorita enää itse lainkaan valtakunnallisia maastoinventointeja, vaan maastotieto tuotetaan automaattisesti puunkorjuu- ja metsänhoito-operaatioiden yhteydessä yksittäisen puun tarkkuudella. Puunhankintaketjussa metsäoperaatioiden jälkeen tieto korjatusta puusta siirtyy ehyenä tehtaalle asti mahdollistaen puuraaka-aineen eräkohtainen seurattavuuden hyödyntämisen. Pelisäännöt metsäkone- ja -sensoritiedon omistajuudelle ja käytölle on päivitetty, ja dataa kerätään, jaetaan ja hyödynnetään aktiivisesti laadittujen suositusten mukaisesti Suomessa vuonna 2035.

Kuvatun Tiekarta 2035 -vision toteuttaminen edellyttää useita toimenpiteitä monelta toimijalta puunhankinnan arvoketjuverkostossa. Keskeisiä toteutumisen kannalta ovat metsäyhtiöt, metsäkoneyrittäjät, metsäkonevalmistajat, metsänomistajat, metsä- ja ympäristöviranomaiset sekä metsäteknologian ja -tieteen tutkijat. Metsäluonnon monimuotoisuuden mittaamiseen ja dokumentointiin ja metsäkoneenkuljettajan opastamiseen metsäkone- ja -sensoritiedon avulla tarvitaan sekä mittareiden määrittelyyn että teknologian ja prosessien kehittämiseen ja standardointiin sekä osaamisen varmistamiseen keskittyviä toimenpiteitä ja investointeja.

Monet teknologiat (mm. tarkkuuspaikannus, reunalaskenta ja metsäkoneiden tietokoneiden laskentateho ja StanForD 2010 -pohjaiset metsäkonetiedostot) voidaan ottaa suhteellisen nopeasti täysimääräisesti tuotantokäyttöön metsäkoneissa. Osa teknologioista vaatii merkittävää kehityspanostusta, jotta ne saadaan tuotantokäyttöön kymmenen vuoden tavoiteajassa. Tähän tarvitaan kaikkien toimijoiden sitoutumista ja tulevaisuuteen suuntautuvaa asennetta.

3.2. Tulosten vieminen käytäntöön

Hankkeessa kehitetyt menetelmät ja tuotettu tieto ovat suoraan hankkeeseen osallistuneen metsäkonevalmistajan käytettävissä. Avointen tieteellisten julkaisujen, opinnäytteiden ja muun tuotetun materiaalin kautta hankkeen tulokset ovat myös muiden hyödynnettävissä. Visio-materiaalin kautta luodataan myös tulevaisuuden kehityssuuntia ja tarpeita, joilla on merkitystä keskusteltaessa tulevaisuuden metsien käytön tavoista ja metsäpolitiikan painopisteistä.

Hankkeen tutkimustuloksia on jo saatu hyödynnettyä käytännössä metsäkoneen paikannuksen luotettavuuden parantumisena erityisesti toimittaessa latvuspeitteen alla. Tätä ovat edistäneet erityisesti kehitetyt ohjelmisto-ominaisuudet satelliittipaikannuksen katkosten varalta. Tutkimuslaitosten tuella on myös pystytty varmentamaan kaupallisen ratkaisun suorituskkyä erittäin tarkkoilla vertailumittauksilla maastossa ja löytämään samalla tilanteita, joissa sitä voidaan vielä kehittää..

Laserkeilainten hyödyntäminen täsmämetsätaloudessa tulee olemaan tulevaisuuden tärkeimpiä edistysaskeleita moderneissa metsäkoneissa. Merkittävimpinä rajoitteina tälle ovat saatavilla oleva kustannustehokas laitteisto, ja sen kesto vaativissa olosuhteissa ympäri vuoden. Algoritmit ovat jo pitkään olleet riittävällä tasolla, jotta kuljettajan työhön voidaan tuottaa hyötyä reaaliaikaisesti.

Viime vuosien kehitys dataan perustuvien mallien tutkimuksessa on luonut pohjan, jonka avulla koneen ohjausjärjestelmän on mahdollista ymmärtää metsän rakennetta laajemmin kuin vain yksittäisen puun tunnuslukujen osalta. Tämä mahdollistaa kuljettajaa avustavien järjestelmien kehittämisen tasolle, jolla hieman tarkemmillekin sensoreille voidaan löytää kustannustaan vastaava hyöty. Nykyisellä kaupallisella toimintamallilla, jossa koneyritykset suurimmaksi osaksi maksavat kaikki uusien järjestelmien kustannukset osana koneen hankintahintaa, on valmistajien kuitenkin arvioitava erittäin tarkasti millä sensoreilla ja järjestelmillä tuotetaan suurin hyöty niiden kustannuksiin nähden. Tämän vuoksi usein taloudellisesti mielekkäimmissä ratkaisuissa yksi sensori tuottaa tiedon monille algoritmeille. Kääntöpuolena on kuitenkin se, että tällainen sensori on usein kallis, ja siten sen ympärille on kehitettävä useita sinällään toissijaisia mutta välttämättömiä ominaisuuksia ennen tuotteen julkaisua. Näiden ominaisuuksien kartoitukselle ja kehitykselle tutkimuslaitosten ja konevalmistajien yhteistyössä toteuttamat tämän hankkeen kaltaiset kokonaisuudet ovat erityisen tärkeitä.

Laserkeilain on tuottamansa pistepilven osalta erittäin sopiva yllä kuvatun järjestelmän pääasialliseksi sensoriksi, koska se mahdollistaa sekä yksittäisten puiden tarkan mittaamisen ja laatueroikkamien tunnistamisen että laajemman metsän kartoituksen muun muassa puiden paikannuksen kautta. Myös metsäkoneen paikannusta voidaan parantaa erityisesti vaikeissa olosuhteissa sen avulla. Kuten yllä todettiin ensimmäisiä hakkuukoneiden laserkeilaimeen pohjautuvien avustavien järjestelmien julkaisua viivyttävät enemmänkin laitteistojen kuin algoritmien kehitys. Kun kokonaisuus saadaan riittävälle tasolle, ensimmäisiä sovelluksia tulevat todennäköisesti olemaan erilaisten harvennusmallien reaaliaikaista toteutumista mittaavat tunnusluvut hakkuukoneen näytöllä, ehdotukset koneen näytöllä kaadettavista ja säästettävistä puista (tihentymät, laatuvirheet ja luontoarvokohteet) sekä työn raportointi metsään jäävän puuston osalta (puukartta: paikka, koko, puulaji ja todelliset luontoarvokohteiden tyypit ja sijainnit). Kuvattuja kaupallisia sovelluksia voidaan odottaa julkaistavaksi lähivuosina, mikäli mainitut laitteistoihin liittyvät haasteet ratkaistaan.

3.3. Tulosten merkitys ja jatkotoimenpiteet

Hankkeessa tuotettu uusi, avoimissa tiedesarjoissa julkaistu tieto on kaikkien saatavilla ja hyödynnettävissä. Hankkeen tuloksia ja aineistoja voidaan käyttää edelleenkehittämiseen ja

uusien hankkeiden ideointiin ja valmisteluun. Metsäkonevalmistajat voivat hyödyntää kehitettyjä menetelmiä ja haastattelututkimuksen tuloksia kehitystyössään, ja myös kuljettajakoulutuksessa voidaan hyödyntää kuljettajien esiin nostamia tarpeita.

Metsäkoneenkuljettajan tuen tarve ja avustavat järjestelmät tulevaisuudessa -haastattelututkimuksen tulokset julkaistaan opinnäytetyönä (Valtteri Kinnunen, Itä-Suomen yliopisto, UEF). Heli Kymäläinen väitteli metsäkoneenkuljettajan opastamisesta syksyllä 2025 Itä-Suomen yliopistossa (Dissertationes Forestales 376). Samoin syksyllä Ville Vähä-Konka väitteli Itä-Suomen yliopistossa; Vähä-Konka selvitti hakkuukonetiedon hyödyntämisestä metsävaratiedon tarkentamisessa (Dissertationes Forestales 370).

Hankkeen julkaisuja on mukana väitöstöiden osajulkaisuna. Binod Kafien metsäluonnon monimuotoisuusväitöstyön ensimmäinen artikkeli julkaistiin hankkeen aikana, toinen on hankkeen päättyessä arviointiprosessissa ja kolmas artikkeli toteutetaan yliopiston UNITE Lippulaiva -rahoituksella hyödyntäen IlmoStar-hankkeessa kerättyjä aineistoja.

Johannes Pohjala (UEF) ja Anwar Sagar (TAU) väittelevät vuonna 2026. Johannes Pohjala on keskittynyt väitöskirjassaan selvittämään Ponsse Harvennusavustin-tuotekonseptin hyötyjä (tuottavuus, korjuujälki ja kuljettajan työssäjaksaminen) harvennushakkuilla verrattuna tilanteeseen, missä hakkuukoneenkuljettajalla ei ole käytössään Harvennusavustimen tuottamaa tietoa. Pohjalan tekemä tutkimustyö on erittäin arvokasta, kun metsäkoneenkuljettajaa opastavia järjestelmiä kehitetään yhdessä niiden käyttäjien (koneenkuljettajien kanssa). Pohjala sai parhaan konferenssiin lähetetyn tiivistelmäpaperin palkinnon kesällä 2025 pidetyssä kansainvälisessä FORMEC 2025 -konferenssissa.

Anwar Sagarin väitöstyö keskittyy laatuvirheiden, erityisesti lenkouden ja mutkien, tunnistamiseen reaaliaikaisesti hakkuutyön aikana. Näin koneenkuljettajalle voidaan jatkossa tarjota mitattuun tietoon perustuvia ehdotuksia puiden kaato-/säätöpäätösten tueksi harvennuskohteilla. Hankkeessa tehty yhteistyö tutkimuslaitosten kanssa on edistänyt merkittävästi hänen työnsä edistymistä, ja sen puitteissa on julkaistu jo kaksi tieteellistä artikkelia (A. Sagar 2024, A. Sagar 2025) ja kolmas on kirjoitusvaiheessa.

Tulosten kentälle jalkauttamisen kannalta on erityisesti metsäkoneiden ominaisuuksien kannalta tärkeää, että jatkotutkimusta suunnataan myös kustannustehokkaiden ratkaisujen kehittämiseen, vaikka niiden avulla saavutetut tulokset eivät esimerkiksi tarkkuudessaan kilpailisi alan ehdottoman huipun kanssa. Tästä yhtenä esimerkkinä on Galileo HAS -järjestelmä, joka voisi tulevaisuudessa tarjota riittävää tarkkuutta joihinkin metsäkonesovelluksiin, jotka kalliimmilla järjestelmillä toteutettuna eivät olisi kaupallisesti julkaistavissa, mutta jotka kuitenkin osaltaan tukisivat kestävästä metsätaloudesta. Esimerkiksi kuormatraktorien tarkka paikannus mahdollistaisi kuormaimen kärjen paikannuksen kartalla. Tämän avulla työn edistymisen seuranta tarkentuisi ja kuljettajalle voitaisiin antaa luotettava ilmoitus, mikäli joitain katkottuja puita olisi vaarassa jäädä keräämättä. Luonnollisesti myös koneen kulkeman reitti tarkentuisi, ja hälytykset mahdollisista vältettävistä alueista tulisivat oikea-aikaisesti ja luotettavasti. Mainitut ominaisuudet vaativat vielä nykyisin melko arvokkaiden laitteiden ja korjaussignaali- ja palvelujen hankintaa, mikä vähentää niihin liittyvää kiinnostusta.