

# Ajouran leveyden määrittäminen ultraäänellä – laitekokeilu

---

Metsätehon tuloskalvosarja 5/2026

Kirsi Rieki, Heikki Ovaskainen ja Jukka Malinen

Metsäteho Oy

# Tiivistelmä

- Puunkorjuun laadunseurannassa tavoitteena on kerätä automaattisesti kattavaa ja objektiivista tietoa eri laatutekijöistä. Tällaista tietoa voidaan käyttää myös kuljettajan avustamiseen korjuutyön aikana.
- Ensiharvennuksilla ajouraleveys on yksi keskeisistä puunkorjuun laatutekijöistä.
  - Nykyisellään toteutuneita ajouraleveyksiä mitataan manuaalisesti otantana korjuujäljen maastotarkastuksissa korjuutyön jälkeen.
- Tässä työssä kehitettiin valmiuksia ajouraleveyden automaattiseen määrittämiseen kokeilemalla ultraäänimittalaitetta uraleveyden jatkuvatoimiseen totaalimittaukseen.
  - Laitteella jäljitellään puunkorjuun tilannetta, jossa ultraäänianturit on asennettu hakkuukoneen sivuille ja ne mittaavat etäisyyttä ajouran reunapuihin työn aikana.
- Ultraäänilaitteella tehtiin mittauksia kahdella sekapuustoisella ensiharvennuskohteella. Laite kiinnitettiin tarkkuuspaikantimeen, ja mittaus suoritettiin kuljettamalla laiteyhdistelmää ajouran keskilinjaa pitkin.
- Laitteella mitattiin 34 cm–yli 3 m etäisyyksiä, ja 2 m etäisyysvyöhykkeeltä havaittiin 68 % ajouran reunapuista.
- Tulosten perusteella jatkuvatoimista etäisyyden ultraäänimittausta voidaan käyttää reaaliaikaiseen ajouran leveyden seurantaan ensiharvennuksilla.
  - Jos ajouran leveys on kasvamassa liian suureksi, kuljettaja voi reagoida nopeasti. Tämä auttaa pitämään ajouraleveyden tavoitteen mukaisena.
- Suurin virhelähde mittauksessa oli uran reunapuiden peittyminen alikasvoksen ja oksien taakse.
- Tämän laitekokeilun pohjalta ultraäänimittauksesta voidaan kehittää operatiivinen kuljettajaa avustava työkalu. Jatkuvatoimisesti mitatut tulokset avaavat myös uusia mahdollisuuksia ajouraleveyden laskentamenetelmien kehittämiseen.



# English summary

- Quality monitoring in harvesting would benefit from collecting objective and broadly inclusive data of quality factors automatically. Providing such data for harvester operators can also support the harvesting work.
- In first thinnings, strip road width is one of the essential quality factors. Currently in Finland, the realized strip road widths are manually measured from few thinning sites by sampling approximately 8–10 values at each site.
- This work contributes to automated determination of strip road width by experimenting continuous and fully comprehensive total measurements of strip road width. A simple pilot device equipped with ultrasonic distance sensors was put together and tested at field.
  - The measurement followed a realistic setup of harvesting: two ultrasonic sensors installed on both sides of the harvester, used to measure the distance to the strip road edge trees continuously during the work.
- The ultrasonic distance measurements were tested at two first thinning sites after harvesting. The test measurements were performed by walking with the device along the middle lines of the strip roads.
  - For validating the results, the ultrasonic device was attached to a high-accuracy global navigation satellite system receiver. The remaining trees near the strip roads were also mapped.
- In these pilot-stage field tests, the total range of measured distances varied between 34 cm and over 3 m. Most of the measured values were within the distance of 2 meters, and approximately 68 % of the mapped strip road edge trees were detected within that zone.
- Based on the results, the continuous distance measurements by using ultrasonic sensors can be used for real-time monitoring of the strip road width and thereby can assist the harvester operator in first thinnings.
  - If the strip road width is increasing over the recommended target value, the harvester operator can react quickly and adjust the width.
- The main source of measurement inaccuracies was that understorey and tree branches covered some stems of the strip road edge trees. At certain thinning sites, this can hinder or completely prevent the distance measurements of those stems.
  - However, the harvester operator can estimate visually the reliability of the measurements.
- In the future, the pilot ultrasonic device can be developed towards operative assisting tool. Additionally, the continuous measurements of the strip road width provide possibilities for utilizing more detailed computation methods for determining the strip road width.



# Johdanto

- Ensiharvennuksessa metsikköön avataan ajourat metsäkoneille. Ajourien leveys on yksi puunkorjuun laadun keskeinen osatekijä.
- Korjuun laadun seurannan yhtenä tavoitteena on saada tietoa laatutekijöistä automaattisesti, kattavasti ja objektiivisesti.
- Laadun seurantamittauksia voidaan tehdä sekä korjuutyön aikana että työn valmistuttua.
  - Korjuutyön aikaisten mittauksien avulla hakkuukoneen kuljettaja saa jatkuvasti tietoa työn laadusta ja voi tarvittaessa vaikuttaa siihen nopeastikin.
- Nykyisellään toteutuneita ajouraleveyksiä mitataan manuaalisesti otantana korjuujäljen maastotarkastuksissa korjuutyön jälkeen (Leivo ym. 2023).
- Metsänhoidon suosituksissa ajourien tavoiteleveys on alle 4,6 m kivennäismailla ja alle 5,1 m turvemailla (Tapio Oy 2026).



# Taustaa: ajouraleveyden määrittäminen

- Ajouraleveys on osin tulkinnallinen tunnus, joka voidaan määrittää monilla eri menetelmillä.
- Ajouraleveyden määrittämiseen on esitetty useita erilaisia koealapohjaisia ja kaikkien reunapuiden totaalimittaukseen perustuvia uraleveysmalleja (Isomäki 1994).
- Koealapohjaisilla otantamittauksilla saadaan vain suuntaa-antavaa tietoa korjuukohteiden ajouraleveyksistä.
  - Esimerkkinä nykyiset korjuun laadun maastomittaukset, jotka on kuvattu tarkemmin seuraavalla dialla.

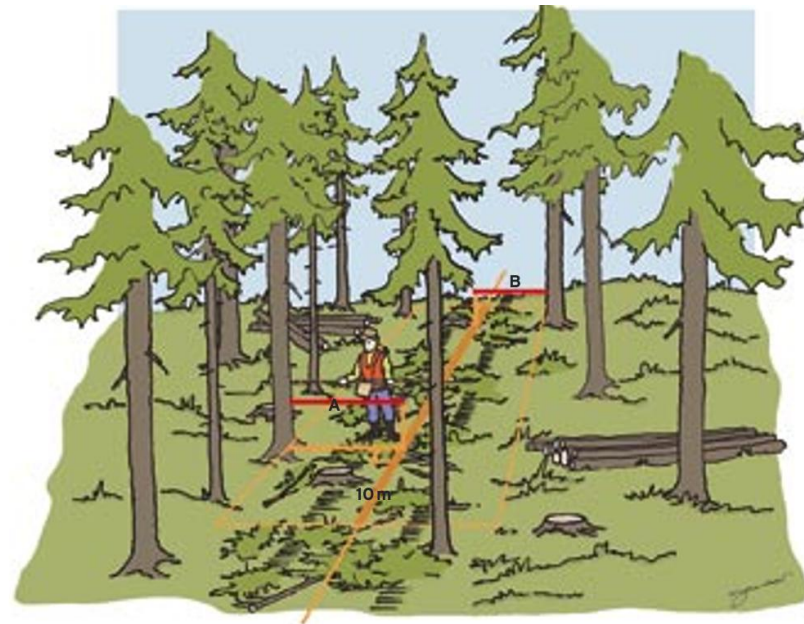


*Ajoura ensiharvennuksella.*

*(Kuva: Sami Karppinen, Metsänhoidon suositukses, Tapio Oy)*

# Taustaa: ajouraleveyden otantamittaus laatutarkastuksissa

- Korjuukohteen ajouraleveys mitataan keskiarvona 8–10 koealalta, jotka sijoitetaan käsitellyn alueen pisimmälle lävistäjälle (Leivo ym. 2023).
  - Mittaukset tehdään vain yli 1 ha korjuukohteille.
- Koealoilta mitataan etäisyydet ajouran keskilinjalta lähimmän reunapuun kylkeen uran kummaltakin puolelta 10 m pituisella uraosuudella (kts. kuva).
- Metsäkeskus on tehnyt valvontamittauksia muutamille sadoille ensiharvennuskohteille vuodessa.
- Otantamittauksia tehdään myös osana puunkorjuun toimijoiden omavalvontaa.



*Havainnollistus ajouraleveyden mittaamisesta yhdellä maastokoealalla. Ajouraleveys = A + B.*

# Ajouraleveyden määrittämisen kehittämistarpeet

- Ajouraleveyden määrittäminen ei nykyisellään täytä puunkorjuun laadunseurannan tavoitteita automaattisesti kerättävästä, kattavasta ja objektiivisesta tiedosta (Ovaskainen 2019).
- Hakkuukoneet tallentavat StanForD-standardin (SkogForsk 2025) mukaisesti kaadettujen puiden sijaintitietoa hyvällä tarkkuudella hpr-tiedostoihin. Toteutuneen ajouraleveyden määrittäminen riittävän luotettavasti hpr-tiedostoista on kuitenkin haastavaa, sillä tietoa jäävästä puustosta ei synny.
- Ilmalaserkeilauksesta saatavien yksinpuintulkittujen puukarttojen avulla voitaisiin periaatteessa saada tietoa ensiharvennusta edeltävästä puustosta. Tällöin jäävä puusto voitaisiin määrittää poistamalla puukartasta hpr-tiedostoihin tallennetut kaadetut puut. Yksinpuintulkittuja puukarttoja ei kuitenkaan ole nykyisellään kattavasti saatavilla ensiharvennuskohteille. Tämän lisäksi:
  - menetelmä olisi monimutkaisempi kuin suoran mittaustiedon käyttö,
  - tiheimmillä kohteilla yksinpuintulkittujen puukarttojen runkoluvun osuvuus on noin 80 % (Muhojoki ym. 2024) ja
  - nuorempien metsien puustotulkinnoissa epätarkkuuksia on yleisestikin enemmän (Metsäkeskus 2026).
- Laserkeilainten käyttöä hakkuukoneissa jäävän puuston puukartan ja muiden laatutekijöiden määrittämiseen on tutkittu paljon (Sagar ym. 2025). Keilaimet hakkuukoneissa eivät kuitenkaan ole yleistyneet, johtuen mm. mekaanisen kestokyvyn haasteista ja pistepilviaineiston prosessoinnin vaatimasta laskentatehosta.
- Näin ollen ajouraleveyden automaattista määrittämistä voidaan edesauttaa kehittämällä erillisiä mittauskeinoja, joiden tarkkuus ja luotettavuus ovat riittäviä ja jotka ovat tarpeeksi kestäviä ja kustannustehokkaita operatiiviseen käyttöön.
  - Hakkuukoneen käyttäminen ”mittausalustana” on joka tapauksessa kattava ratkaisu ajouraleveyden määrittämiseen sekä korjuutyön aikana että sen jälkeen.



# Tavoite

- Ultraäänianturien käyttö etäisyyden mittaamiseen on nykyisin yleistynyt mm. autojen peruutustutkissa. Anturit ovat edullisia, testattuja ja kestäviä.
- Mikäli anturit kiinnitetään hakkuukoneeseen, voisi hakkuukoneen kuljettaja tarkkailla korjuutyön edetessä syntyvän ajouran leveyttä.
- Tässä työssä tavoitteena oli selvittää, voidaanko ultraäänimittauksilla määrittää korjuukohteen ajouraleveys jatkuvatoimisena totaalimittauksena.  
→ Työssä valmistettiin laite, jolla kokeiltiin ajouraleveyden totaalimittausta.
- Työ tukee myös ajouraleveyden mallinnuksen kehittämistä tilanteessa, jossa tunnetaan ajouraa reunustavien puiden etäisyys uran keskilinjasta kattavasti koko korjuukohteelta.

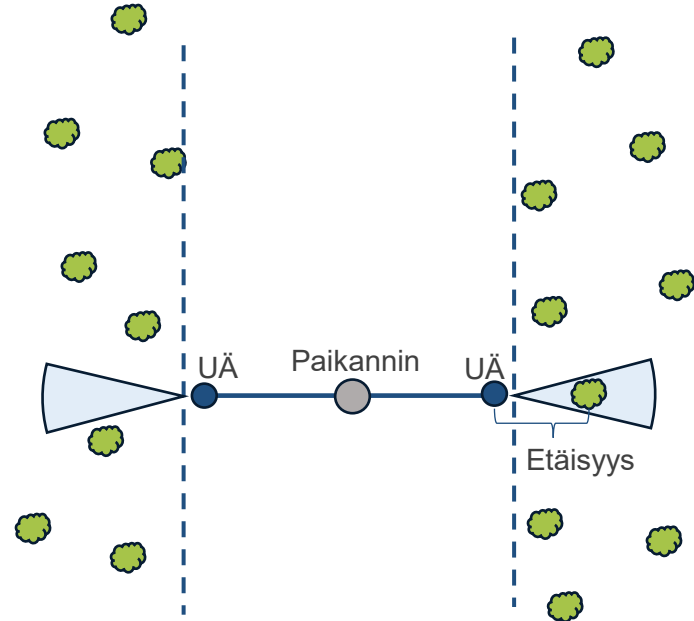


*Etäisyyttä mittaava vesi- ja pölytiivis ultraäänianturi DFRobot ME007YS, jollaisia käytettiin tässä työssä.  
(Kuva: [www.dfrobot.com/product-1933.html](http://www.dfrobot.com/product-1933.html))*

# Ultraäänilaitteen mittausperiaate

## *Jatkuvatoiminen ajouran reunapuiden etäisyyden mittaus*

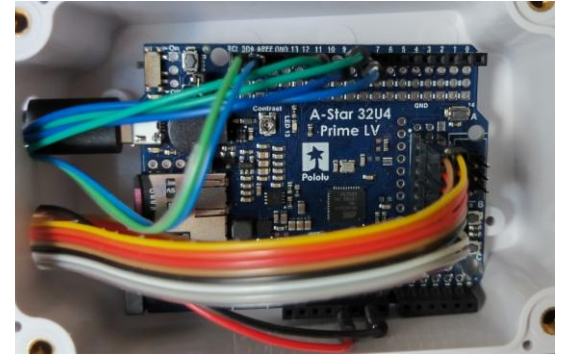
- Mittauksessa jäljitellään puunkorjuun tilannetta, jossa etäisyyttä mittaavat ultraäänianturit on asennettu hakkuukoneen sivuille.
  - Hakkuukoneiden leveys on nykyisin noin 2,6–3,6 m. Siten esimerkiksi 4,6 m levyisellä ajouralla etäisyys koneen sivulta lähimpiin ajouran reunapuihin on noin 0,5–1 m.
  - Hakkuukoneen hytin katolla on paikannusvastaanotin.
- Laitteessa on säädettävä tukivarsi (2,0–3,6 m), jonka päihin ultraäänianturit kiinnitetään.
- Laite kiinnitetään keskeltä vaakasuuntaisesti tarkkuuspaikantimeen, jotta saadaan mittauksen sijaintitieto.
- Mitataan jatkuvatoimisesti etäisyyttä ajouran reunapuihin ajouran keskellä kulkien.
- Mitataan kohteita, joilla ensiharvennus on jo tehty.



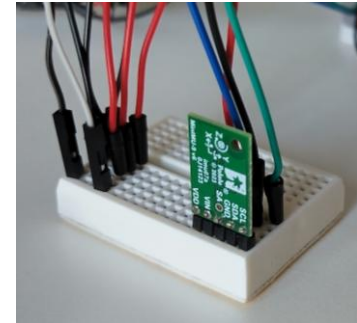
*Ultraäänilaitteen mittaus tilanne ylhäältä päin esitettynä.*

# Laitteen osat ja valmistus

- Laitteen piirilevynä on [Pololu A-Star 32U4 Prime LV](#).
  - Piirilevy sisältää micro-SD-korttipaikan.
- Etäisyyden mittausta varten laitteessa on kaksi [DFRobot ME007YS](#) -ultraäänianturia, jotka ovat vesi- ja pölytiivitä IP67-standardin mukaisesti.
  - Valmistajan ilmoittama mittausetäisyys 28–450 cm.
  - Etäisyyden mittaustaaajuus tässä kokoonpanossa on yksi havainto/anturi/s.
- Kompassi-gyroskoopin [Pololu MinIMU-9 v6](#) avulla voidaan määrittää laitteen suuntaus.
- Laitteen osiin tehtiin tarvittavat juotokset ja ne kytkettiin yhteen.
- Osat kiinnitettiin tukivarteen, joka edelleen kiinnitettiin tarkkuuspaikantimeen.
  - Paikantimena käytettiin Trimblen R12i-vastaanotinta, jolla mitattiin reaaliaikaisesti korjattuja sijainteja (engl. real time kinematic). Paikantimen nimellistarkkuus vaihtelee tyypillisesti muutamasta senttimetristä noin 10 senttimetriin.



Osat kytkettiin piirilevyyn ja micro-SD-kortti paikalleen piirilevyn vasempaan reunaan.

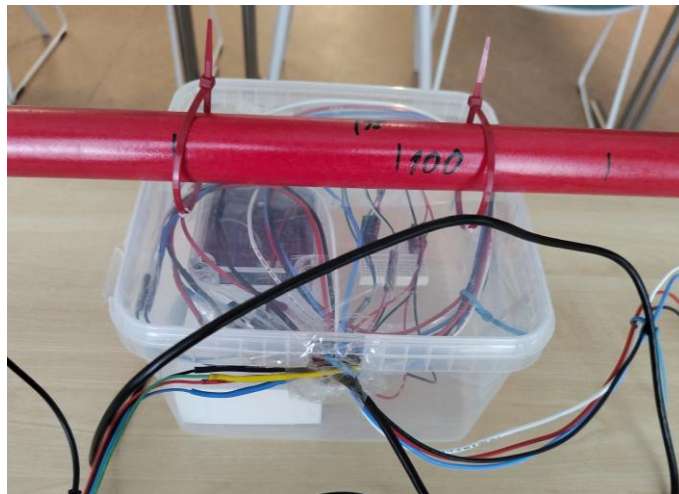


Elektroninen kompassi (vihreä piirilevy, kooltaan noin 1 cm x 2 cm) kytkettiin laitteeseen erillisen kytkentälevyn avulla.

# Ultraäänilaite koottuna



*Ultraäänianturit kiinnitettiin tukivarren päihin.*



*Laitteen muut osat pakattiin suojalaatikkoon, jota voidaan liu'uttaa tukivartta pitkin.*

# Ultraäänilaitteen ohjelmointi

- Laitteen piirilevy ohjelmoitiin suorittamaan mittaukset C-ohjelmointikielellä Arduino IDE -käyttöliittymässä, joka on avoimesti saatavilla.
  - Apuna käytettiin laitteen osien valmistajien tarjoamia valmiita kirjastoja, jotka myös olivat avoimesti saatavilla.
- Laite ohjelmoitiin tallentamaan mitatut etäisyyshavainnot, laitteen kompassisuunta sekä mittauksessa kulunut aika noin sekunnin välein tekstitiedostoon piirilevyn micro-SD-kortille.
  - Mittaus käynnistettiin kytkemällä piirilevyyn ulkoinen virtalähde.
  - Myös laitteen kolmiulotteisen asennon tallentamista kokeiltiin, mutta piirilevyn muisti ei riittänyt siihen yhtä aikaa ultraäänimittausten kanssa.
    - Tukivarren pitäminen likimain vaakatasossa mittausten aikana arvioitiin riittäväksi ratkaisuksi kompensoimaan täyden asentotiedon puuttuminen, erityisesti kun huomioidaan koko paikannus- ja ultraäänilaitte-yhdistelmän mittaustarkkuus.
- Tallennetut tiedot voidaan siirtää erillisellä ohjelmalla mittausten jälkeen micro-SD-kortilta työasemalle.



# Mittauskohteet

- Laitetta kokeiltiin kahdella sekapuustoisella ensiharvennuskohteella, joille rajattiin noin 1 ha kokoiset mittausalueet (mittausalue 1 ja 2).
  - Kohteet oli harvennettu ennen mittauksia.
  - Kohteet sijaitsivat Kaakkois-Suomessa.
- Ultraäänilaitteella mitattiin yhden ajouran leveyksiä kummaltakin mittausalueelta.
  - Mitatut ajourat olivat yhtenäisiä, lähes suoraan eteneviä ajouraosuuksia, joiden pituudet olivat noin 160 m ja 120 m.
- Referenssiaineistoksi kartoitettiin tarkkuuspaikantimella mittausalueiden pystypuiden sijainnit (puukartta) harvennuksen jälkeen.
  - Kaikki yli 45 mm rinnankorkeuslähpimitaltaan olevat puut kartoitettiin.



*Ajouraa ensiharvennuksen mittausalueelta 1. Puusto oli vähäoksaista ja sisälsi myös jonkin verran haapoja. Alikasvosta ei juuri ollut, joten puiden rungot erottuivat ajouran varresta melko selkeästi.*

# Mittaukset

- Tarkkuuspaikantimeen kiinnitetyn ultraäänilaitteen kanssa kuljettiin mitattavan ajouran keskilinjaa pitkin.
- Ultraäänilaite tallensi mitatut etäisyydet, kulkusuunnan ja mittausajan noin sekunnin välein.
  - Mittausten aloitusajat katsottiin tarkkuuspaikantimen maastotietokoneen kellosta ja tallennettiin manuaalisesti mittaustulosten yhteyteen.
- Tarkkuuspaikantimella tallennettiin sijainteja aikaleimoineen kuljetulta reitiltä myös noin sekunnin välein.
- Ultraäänilaitteen tukivarren pituus mittauksissa oli 3,6 m (mittausalue 1) ja 3,0 m (mittausalue 2).
- Laitetta kuljetettiin likimain rinnankorkeudella.
- Etenemisvauhti mittauksen aikana oli keskimäärin noin 17 m/min, joka vastaa vauhtia 1 km/h.

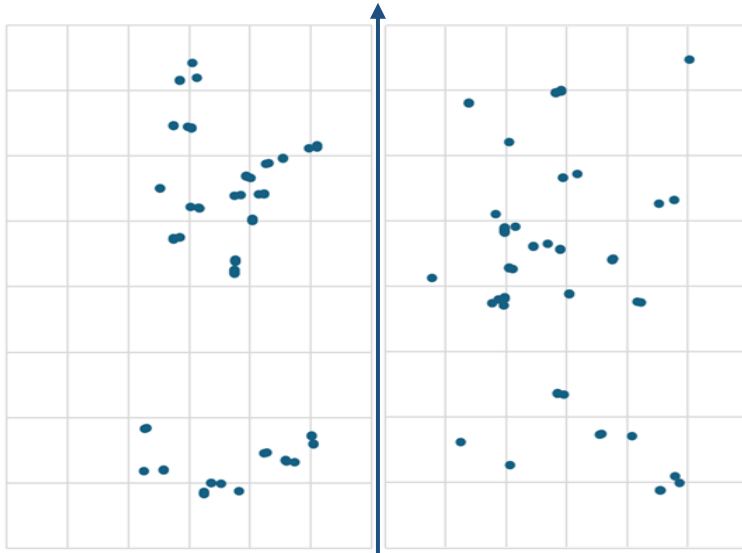


# Mittausten vertailu referenssipuukarttaan

- Mittausten onnistumista arvioitiin vertaamalla ultraäänilaitteen mittauksia tarkkuuspaikannettuun referenssipuukarttaan paikkatieto-ohjelman karttanäkymässä.
- Tätä varten ultraäänimittauksiin yhdistettiin mittalaitteen keskipisteen tarkkuuspaikannetut koordinaatit aikaleimojen perusteella.
  - Yhdistämistulos tarkastettiin ja sitä hienosäädettiin manuaalisesti.
- Havaintojen koordinaatit laskettiin edelleen laitteen keskipisteen koordinaattien, tukivarren pituuden ja laitteen suuntauksen avulla.
  - Elektroninen kompassi oli melko herkkä häiriöille, joten laitteen tallentamat suunta-arvot tarkastettiin ja tarvittaessa niitä korjattiin manuaalisesti.
- Tarkkuuspaikannuksen sijaintiepätarkkuus lienee yleisesti ottaen suurempi kuin ultraäänianturien mittaustarkkuus.
  - Siten mittausten näennäinen epätarkkuus karttanäkymässä voi olla suurempi kuin pelkkien ultraäänellä tehtyjen etäisyysmittausten mittaustarkkuus todellisuudessa on.

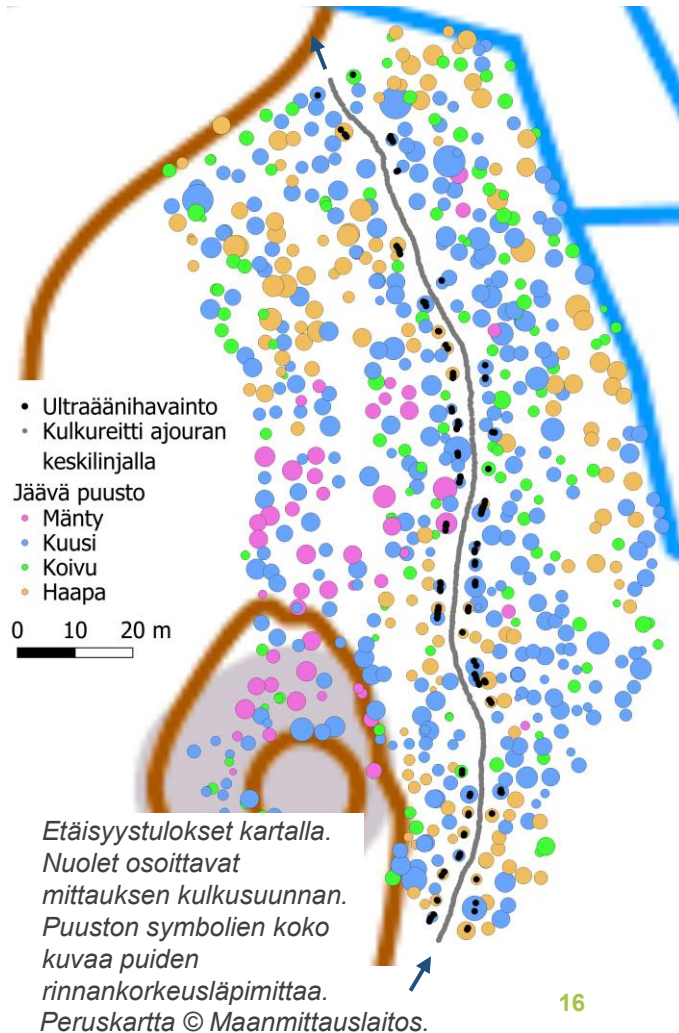


# Tulokset: mittausalue 1

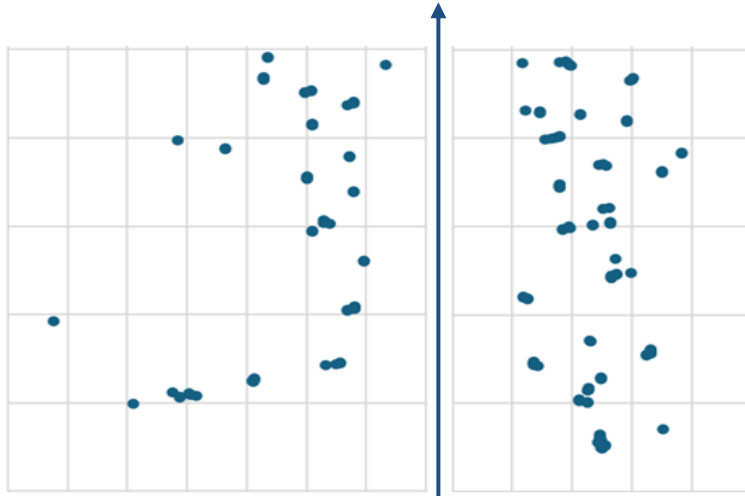


Mitattu etäisyys 300 250 200 150 100 50 0 50 100 150 200 250 300 cm  
Puiden etäisyys 4,8 4,3 3,8 3,3 2,8 2,3 2,3 2,8 3,3 3,8 4,3 4,8 m  
ajouran keskilinjalta

*Jatkuvatoimisesti mitatut etäisyystulokset. Nuoli osoittaa mittauksen kulkusuunnan. Vaaka-akselilla mitattu etäisyys laitteen päistä ja mitattujen puiden etäisyys ajouran keskilinjalta, kun huomioidaan tukivarren pituus 3,6 m. Laitetta kuljetettiin kävelemällä pitkin ajouran keskilinjaa.*

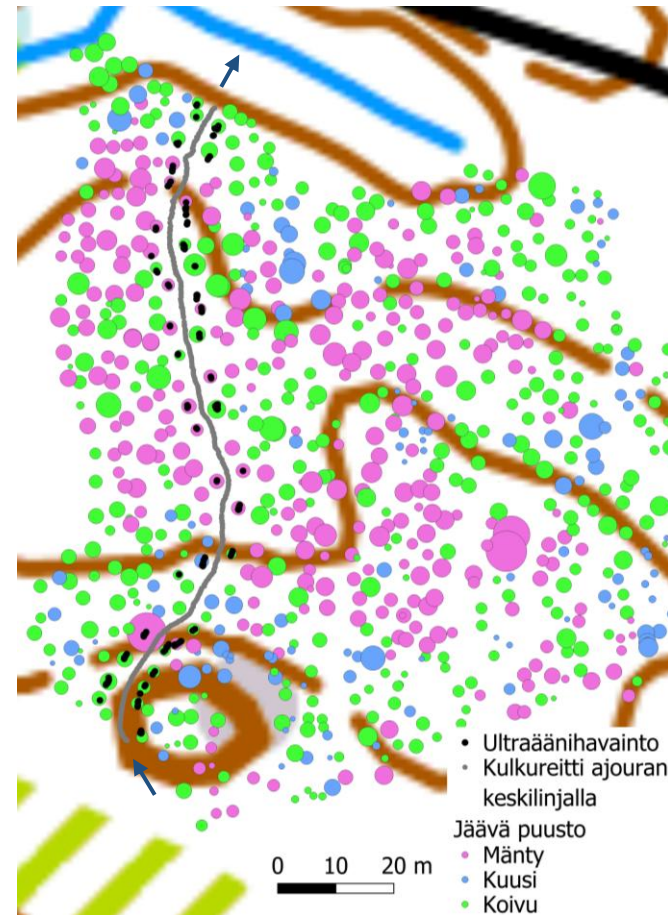


# Tulokset: mittausalue 2



Mitattu etäisyys 350 300 250 200 150 100 50 0  
Puiden etäisyys 5,0 4,5 4,0 3,5 3,0 2,5 2,0  
ajouran keskilinjalta 2,0 2,5 3,0 3,5 4,0 m

*Jatkuvatoimisesti mitatut etäisyystulokset. Nuoli osoittaa mittauksen kulkusuunnan. Vaaka-akselilla mitattu etäisyys laitteen päistä ja mitattujen puiden etäisyys ajouran keskilinjalta, kun huomioidaan tukivarren pituus 3,0 m. Laitetta kuljetettiin kävelemällä pitkin ajouran keskilinjaa.*



*Etäisyystulokset kartalla. Nuolet osoittavat mittauksen kulkusuunnan. Puuston symbolien koko kuvaa puiden rinnankorkeusläpimittaa.*

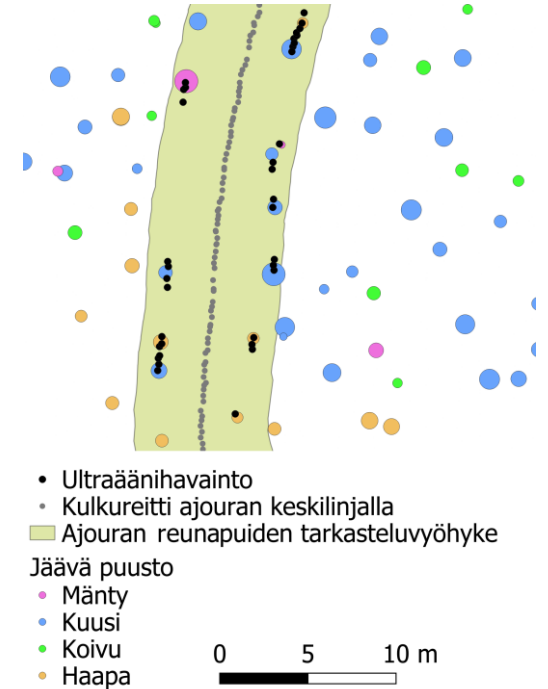
*Peruskartta © Maanmittauslaitos.*





# Tulokset: ajouran reunapuiden havaitseminen

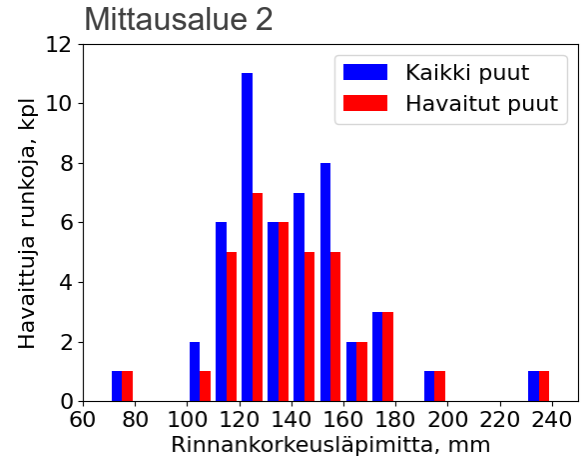
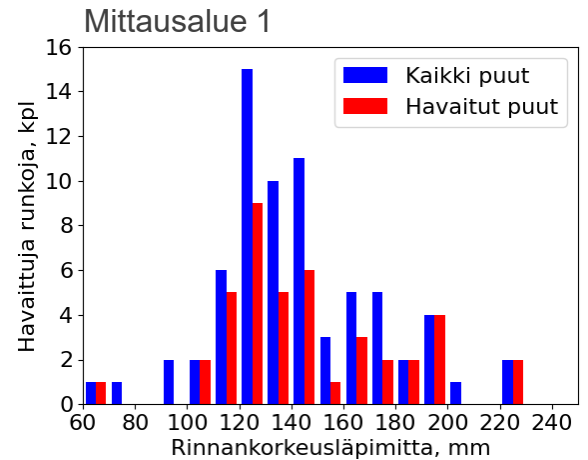
- Havaittujen pystypuiden lukumääriä tarkasteltiin 2 m etäisyysvyöhykkeellä laitteen mittausreitit molemmin puolin.
  - Suurin osa ajouran reunapuista sijaitsee tällä etäisyydellä hakkuukoneen sivuilla.
  - Myös tässä työssä mittaustulokset osuivat enimmäkseen tälle vyöhykkeelle.  
→ Tässä työssä ajouran reunapuilla tarkoitetaan näitä puita.
- Mittauksissa havaittiin yhteensä keskimäärin 68 % ajouran reunapuuta (81/120 puuta).
  - Mittausalueella 1 havaittiin 43 puuta 71:stä, eli noin 61 %.
  - Mittausalueella 2 havaittiin 38 puuta 49:stä, eli noin 78 %.
  - Laitteen kuljetusvauhti yhdessä mittaussyklin (yksi havainto/anturi/s) kanssa on voinut vaikuttaa siihen, ”ehditäänkö” puuta mitata.
- Lisäksi aineistosta havaittiin:
  - Tarkastelu­etäisyyden ulkopuolelta puiden runkoja yhteensä 5 kpl.
  - Muutamissa kohdissa puiden oksia hieman kauempana rungosta.
  - Yksittäisiä mittaustuloksia alikasvoksesta tms., jotka eivät olleet selkeästi yhdistettävissä mihinkään referenssiaineiston puuhun.



*Ajouran reunapuiden tarkastelualuetta mittausalueella 1. Laitteen tukivarren pituus oli 3,6 m ja vyöhykkeen kokonaisleveys 7,6 m. Peruskartta © Maanmittauslaitos. 19*

# Tulokset: puun läpimitan vaikutus havaitsemiseen

- Puiden havaitseminen ultraäänimittauksessa riippui jonkin verran niiden rinnankorkeusläpimitasta.
- Oheisissa kuvissa on esitetty kaikkien 2 m etäisyysvyöhykkeellä sijaitsevien referenssipuiden ja mittauksessa havaittujen puiden läpimittajakaumat välillä 60–240 mm.
  - Mittausalueiden harvennuksen jälkeinen pystytuusto ei sisältänyt kaikkia tarkasteluvälin läpimittaluokkia.
  - Osa alle 220 mm puista jäi havaitsematta.
  - Läpimitaltaan yli 240 mm puita oli yhteensä 2 kpl ja ne molemmat havaittiin mittauksessa.



Puiden havaitseminen  
ultraäänimittauksella 10 mm  
läpimittaluokittain välillä 60–240 mm.



# Ultraäänimittauksen käyttökelpoisuus ajouran leveyden seurantaan

- Ajouran reunapuiden etäisyyttä ensiharvennuksilla voidaan mitata jatkuvatoimisesti ultraäänellä.
  - Jo tässä laitekokeilussa havaittiin enin osa ajouran reunapuista, ja mittauksista on mahdollista kehittää edelleen.
- Mittaus tuottaa kuljettajalle sellaisenaan käyttökelpoista tietoa ajouran leveydestä.
  - Mittaustulosten yhdistäminen koordinaatteihin ja vienti karttanäkymään on mahdollista, mutta ei välttämätöntä.
- Ajouran leveneminen yli tavoitearvon voidaan tunnistaa suoraan mitatuista etäisyysarvoista ja ilmoittaa kuljettajalle nopeasti.
  - Liian leveän ajouran tunnistaminen voidaan tehdä myös välillisesti etäisyysmittausten puuttumisesta, mikäli ajouran reunapuut ovat mittalaitteen kantamaa kauempana.
- Ultraäänimittaukseen eniten virhettä aiheuttavat alikasvos ja oksat, sillä puiden runkoja ei välttämättä eroteta niiden takaa.
  - Alikasvos ja oksien määrä riippuu paljolti ensiharvennuskohteen ominaisuuksista, kuten puulajista ja puuston tiheydestä ennen hakkuuta.
  - Kuljettaja voi kuitenkin arvioida mittausten luotettavuutta kohteen peitteisyyden perusteella.

→ Jatkuvatoimisesti mitattua ajouran leveyttä voidaan käyttää reaaliaikaisesti kuljettajaa avustavana tietona, jonka avulla voidaan arvioida toteutunutta leveyttä tavoitearvoon nähden.



# Ajouraleveysmittausten kehittämismahdollisuuksia

- Ultraäänimittaus:
  - Hakkuukone kulkee ajouraa pitkin keskimäärin hitaammin kuin ultraäänilaitetta kuljetettiin tämän työn maastomittauksissa. Hitaampi etenemisvauhti parantaa edellytyksiä havaita ajouran reunapuita.
  - Tässä työssä käytetyt ultraäänianturit olivat edullisimmasta päästä vesi- ja pölytiivitä antureita. Kallimman hintaluokan antureilla ajouran reunapuiden havaitsemisosuus oletettavasti kasvaa.
- Vaihtoehtona ultraäänelle on pohdittu laser-etäisyysmittausta. Tämän työn maastomittauksien yhteydessä testattiin tämän vuoksi myös manuaalikäyttöistä laser-etäisyysmittaria.
  - Alikasvos ja oksat häiritsivät rungon etäisyyden mittausta myös lasermittarilla hyvin samaan tapaan kuin ultraäänimittauksessa.
  - Mittaustarkkuuksien ero ultraääni- ja lasermittausten välillä on pieni suhteessa muihin tämänhetkisiin ajouraleveyden mittauksen epätarkkuuksiin (mm. alikasvos ja oksat).



# Ajouraleveyden mittaukset ja automaattinen puunkorjuun laadunhallinta

- Ajouran leveyden automaattinen ja jatkuvatoiminen etäisyysmittaus puunkorjuun laadun raportointia varten vaatii vielä kehittämistä.
  - Alikasvoksen ja oksien vaikutus puunrungon etäisyyden mittaukseen pitäisi pystyä poistamaan.
  - Tämän jälkeen mittaustarkkuutta olisi vielä hienosäädettävä huomioimalla mm.:
    - mittalaitteen (hakkuukoneen) kolmiulotteinen kallistusasema,
    - käytettävien mittauslaitteiden tekninen suorituskyky ja
    - runkojen pyöreys ym. mittaustarkkuuteen yksityiskohtaisesti vaikuttavat tekijät.
- Tarvitaan myös ajouraleveyden laskentamenetelmien kehitystä jatkuvatoimisen mittauksen tulosten täysimääräistä hyödyntämistä varten.



# Viitteet

- Isomäki A (1994) Ajouran leveyden määrittäminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 501, 1994.
- Leivo J, Partanen J, Hytönen H, Leppijoki N, Pulkkanen T, Haataja L, Pirkonen J, Partamies M, Santapukki R, Nousiainen M, Pakkanen N (2023) Tarkastusohje, Metsäkeskus. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/sites/default/files/document/tarkastusohje.pdf>. Viitattu 17.3.2026.
- Metsäkeskus (2026) Metsävaratiedon laatu. Saatavissa: <https://www.metsakeskus.fi/fi/avoin-metsa-ja-luontotieto/tietojen-yllapito/tiedon-laatu> Viitattu 17.3.2026.
- Muhojoki J, Tavi D, Hyyppä E, Lehtomäki M, Fäitli T, Kaartinen H, Kukko A, Hakala T, Hyyppä J (2024) Benchmarking Under- and Above-Canopy Laser Scanning Solutions for Deriving Stem Curve and Volume in Easy and Difficult Boreal Forest Conditions. Remote Sensing 16(10):1721. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/rs16101721>.
- Ovaskainen H (toim.) (2019) Kohti automaattista puunkorjuun laadun mittaamista. Metsätehon raportti 251. Saatavissa: <https://www.metsateho.fi/kohti-automaattista-puunkorjuun-laadun-mittaamista/>.
- Sagar A, Pohjala J, Muhojoki J, Dhital A, Kaartinen H, Kärhä K, Järvelin K, Ghabcheloo R, Hyyppä J, Kankare V (2026) Utilising mobile laser scanning point clouds to assess harvesting quality in thinning stands. Science of Remote Sensing (13) 100374. Saatavissa: <https://doi.org/10.1016/j.srs.2026.100374>.
- Skogforsk (2026) StanForD/StanForD 2010 Standard for Forest Machine Data and Communication. Saatavissa: <http://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>. Viitattu 17.3.2026.
- Tapio Oy (2026) Metsänhoidon suositukset. Saatavissa <https://metsanhoidonsuosituksset.fi/fi>. Viitattu 17.3.2026.



# Kiitokset

- Metsätehon tutkimusta on osarahoitettu Kestävän metsätalouden todentaminen ja menetelmät (KESTOTÄSMÄ) -hankkeesta, jota rahoittaa EU:n elpymis- ja palautumistukiväline (RRF).



Euroopan unionin rahoittama –  
NextGenerationEU

- Ultraäänilaitteen suunnittelussa, valmistuksessa ja käyttöönotossa tehtiin yhteistyötä Robomaa Oy:n Jyri Koskisen kanssa.
- Laitteen valmistuksessa tehtiin yhteistyötä Otaniemen lukion fysiikan lehtori Ville Saarikiven, FY12-kurssin ja opiskelija Heikki Riekin kanssa.
- Maastomittaukset ultraäänilaitteella ja referenssipuuston kartoituksen toteuttivat Atte Tarvainen ja Riku Tarvainen Metsätehosta.