

Automaattinen ajouraverkoston laadunseuranta AATU – menetelmän pilotointi

Metsätehon tulokalvosarja 3/2025

Maija-Stiina Arponen¹, Kirsi Rieki², Heikki Ovaskainen² ja Jukka Malinen²

¹Hämeen Ammattikorkeakoulu

²Metsäteho Oy

Tiivistelmä

- Hyvin toteutetut ajouraverkostot ovat keskeinen osa ensiharvennusten korjuun laatua. Ajouraverkoston sijoittamiseen korjuukohteella vaikuttavat mm. kohteen maasto- ym. taustatekijät.
 - Metsäteho on kehittänyt automaattisen ajourien laadunseuranta- eli AATU-menetelmän, jolla tunnistetaan suosituksista poikkeavat ajouraverkostot ja selvitetään kohteiden taustatekijöistä syitä urastopoikkeamiin (Sorsa ym. 2025). Lähtötietoina käytetään hakkuukonetiedosta laskettuja ajouraverkostoja.
 - Tässä työssä pilotoitiin AATU-menetelmän toimivuutta ensiharvennuskohteilla. Tulosten luotettavuuden arviointia varten tallennettiin myös kyseisistä ajouraverkostoista maasto- ja ilmakuvareferenssejä.
 - AATU-menetelmällä löydettyjä poikkeavia kohteita käytiin läpi manuaalisesti ja arvioitiin, oliko kohteen ajouraverkosto poikkeava.
 - Ajouraverkostoihin poikkeamia aiheuttavat taustatekijät pystyttiin tunnistamaan merkittävälle osalle kohteista avoimien paikkatietojen avulla. Kuljettajan osaamattomuudesta tai tarkoituksellisista laiminlyönneistä johtuvia poikkeamia ei havaittu tämän työn aineistossa.
 - Hakkuukonetietoihin perustuva AATU-menetelmä toimii hyvin sekä poikkeamien löytämiseen että niiden syiden selvittämiseen, mikä vähentää maastotarkastusten tarvetta. Jatkossa poikkeamien syiden selvittäminen voidaan automatisoida avoimien paikkatietoaineistojen avulla.
- AATU on erittäin potentiaalinen menetelmä puunkorjuun laadun automaattiseen omavalvontaan ensiharvennuksilla.



English summary

- The goodness of the strip road networks plays an essential role in quality of the harvesting at first thinnings.
 - The location of the strip road network at the harvested stand is affected by the background factors, e.g. terrain properties and shape of the stand.
- Metsäteho has developed an automated method for monitoring quality of the strip roads (AATU), which aims to identify deviating strip road networks and to examine factors causing the deviations
 - The deviations are identified automatically based on the variables of the strip road networks that are computed from stem-wise location data of harvesters.
- This work piloted the AATU method with operational harvester data of realised first thinnings in Finland.
 - To estimate the reliability of the results, reference strip road networks were recorded in field using high accuracy positioning device and by digitizing from aerial orthoimages.
- The dataset of this work included 1 234 first thinning sites, of which AATU identified 370 deviating strip road networks. Further, 165 of those were manually inspected and 114 of the inspected sites were assessed deviating.
- The cause of deviation was found for most (96 %) of the deviating strip road networks by using the base map. Two most common causes were high variation of terrain elevation and ditches. Harvester operator's lack of expertise or carelessness was not observed in this work.
- Based on the results, AATU works very well to both identify and explain the deviations of the strip road networks.
 - Thus, AATU reduces the need to inspect the quality of the thinning sites in field after harvesting.
 - In the future, the examination of factors causing deviations to strip road networks can be automated by using the open geographic data.

→ AATU is very potential method to automate forest companies' self-monitoring of the harvesting quality at first thinnings.



Johdanto

- Ensiharvennukset ovat tärkeitä metsän terveyden, kasvukyvyn ja taloudellisen kannattavuuden kannalta koko metsän kiertoajalla.
- Hyvin toteutetut ajouraverkostot ensiharvennuksilla ovat puunkorjuun laadun keskeinen tekijä.
- EU:n elpymis- ja palautumistukivälineen (RRF) rahoittaman KESTOTÄSMÄ-hankkeen yhtenä tavoitteena on kehittää puunkorjuun omavalvonnan automatisointia.
- Metsäteho on aikaisemmin kehittänyt menetelmän, jolla voidaan tuottaa automaattisesti kuviokohtaisia ajouraverkostoja ja ajouratunnuksia hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen (Ovaskainen & Riekkilä 2022).
- Automaattiset laskentamenetelmät mahdollistavat alueellisesti kattavan ja objektiivisen puunkorjuun laadun seurannan hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen.

Taustaa: ajouraverkoston toteuttamiseen vaikuttavia tekijöitä

- Nykyisessä puunkorjuussa hakkuukoneenkuljettaja suunnittelee ja toteuttaa korjuukohteen ajouraverkoston huomioiden mm. ennalta tunnistetut monimuotoisuudelle tärkeitä kohteet.
- Hakkuukoneen puomin ulottuma ja ensiharvennushakkuun toteutustapa määrittävät lähtökohtaisesti ajouraverkoston ajouraväliä.
 - Korjuukohde pyritään harventamaan siten, että ajourien väliin ei jää harventamatonta kaistaletta.
- Toisinaan korjuukohteen maasto-olosuhteet määrittävät reunaehdot toteutetulle ajourastolle. Olosuhdetekijöitä ovat mm.:
 - Kohteen maastonpiirteet, mm. korkeusvaihtelut, kosteat alueet, ojat ym., jotka vaikuttavat metsäkoneiden liikkumiseen.
 - Kohteen puusto, esimerkiksi paikalliset harvemmat kohdat tai tiheiköt, jotka jätetään monimuotoisuussyistä harventamatta.
 - Jo ennen ensiharvennusta olemassa olevat vanhat kokoojaurat alueella tai ajourat alueen reunoilla, jotka vaikuttavat ajourasuunnitteluun.
- Korjuuolosuhteiden vaikutusta ajourien sijoittamiseen on selvitetty jo aiemmin mm. keräämällä koneenkuljettajien hiljaista tietoa aiheesta (Turunen & Ovaskainen 2018).
- Korjuuolosuhteiden lisäksi harvennusalueen muoto ja koko sekä kiinteistöjako voivat vaikuttaa ajouraverkoston sijoittamiseen.
- Metsänomistaja voi myös antaa ohjeita korjuun toteuttajalle.



Taustaa: suositusten mukaiset ajouraverkostot

- Metsänhoidon suosituksissa ajouravälin arviointikriteerinä kasvatushakkuilla on 19 metriä tai yli (Tapio Oy 2025).
 - Kriteerin kuvaus: "Ajouraväli on tehty suositusten mukaisesti. Kohteen ominaisuudet, kuten maastonvaihtelu ja kivisyys voi vaikuttaa tavoitteeseen."
- Hyvänä käytännön arvona pidetään kuitenkin vähintään 20 m ajouraväliä.
 - Tämä arvo on mainittu aiemmissa metsänhoidon suosituksissa hyvän korjuujäljen kriteerinä (Äijälä ym. 2019).
- Suomen metsäkeskuksen tarkastusohjeessa (Leivo ym. 2023) täsmennetään ajouratunnusten laadun mittaamista:
 - "Ajouraväli [...] mitataan kohteilta, joissa runkoluku on yli 600 runkoa/ha."
 - "Lisäksi ajouraverkoston tulee olla osittain tai kokonaan uusi."
 - "Ajouraväli mitataan vain sellaisilta kuvioilta, joiden pinta-ala on vähintään yksi (1) hehtaari ja kuvion muoto mahdollistaisi normaalin ajouraverkoston luomisen."
 - "Leimikon muodosta johtuvia ajouraverkoston kapeikkokohtia ei oteta huomioon ajouraväliä määritettäessä."
 - "Suositusta (>20 m) kapeampi ajouraväli voidaan hyväksyä, jos uraverkosto on suunniteltu niin, että se vastaa kohteen sarkaleveydelle suositeltua ajourasijoittelua."
 - "Ajouraväli mitataan ojitetuilla turvemaakohteilla, jotka ovat muodoltaan tai ojaverkostoltaan epäsäännöllisiä. Säännöllisen ojaverkoston mukaisilla kohteilla ajouraväli voidaan laskea jakamalla kuvion leveys ajourien määrällä."

AATU-menetelmä – automaattinen ajourien laadunseuranta

- Metsäteho on kehittänyt AATU-laskentamenetelmän, jolla pyritään tunnistamaan automaattisesti laatupoikkeamat ajouraverkostoissa ja selvittämään, ovatko maasto-olosuhteet ym. taustatekijät vaikuttaneet niiden syntyyn (Sorsa ym. 2025).
- Menetelmän lähtötietoina käytetään hakkuukonetiedoista laskennallisesti tuotettuja ajouraverkostoja.
- Poikkeavia korjuukohteita haetaan ajouraverkostojen tunnuslukujen perusteella metsänhoidon suosituksiin verraten.
- Löydetyiltä poikkeavilta kohteilta selvitetään korjuuseen vaikuttaneita taustatekijöitä avoimien paikkatietoaineistojen avulla.

Tavoite

- Tässä työssä pilotoitiin AATU-menetelmän toimintaa ensiharvennusten hakkuukoneaineistoilla.
 - Poikkeavissa tapauksissa ajouraverkostoihin vaikuttavia taustatekijöitä selvitettiin manuaalisella läpikäynnillä.
- Pilotoinnin tavoitteena oli varmentaa AATU-menetelmän käyttökelpoisuus täysimääräistä automatisointia varten.
- Työssä tarkasteltiin myös ajouraverkostojen maasto- ja ilmakuvareferenssejä suhteessa laskennallisesti tuotettuihin verkostoihin.
 - Referenssillä tarkoitetaan laskennalliseen ajouraverkostoon verrattavaa verkostoa, joka on laadittu saman korjuukohteen verkostosta joko maastossa kartoittamalla tai ilmakuvasta digitoimalla.
 - Voitiin selvittää korjuukohteiden taustatekijöiden vaikutusta referenssiajouraverkostojen ajouratunnuksiin, mikä on oleellista AATU-menetelmän käyttökelpoisuuden arvioinnissa.
 - Lisäksi saatiin tietoa ilmakuvareferenssien vastaavuudesta maastoreferensseihin nähden sekä hakkuukonetiedosta laskennallisesti tuotettujen ajouraverkostojen vastaavuudesta molempiin referensseihin nähden.
- Maija-Stiina Arponen on laatinut työn pohjalta AMK-opinnäytetyön (Arponen 2024).

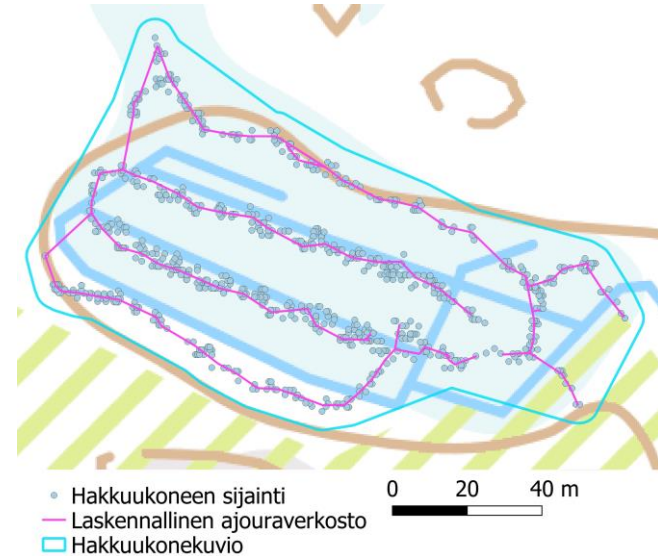


AATU-menetelmän pilotointi hakkuukonetiedosta tuotetuilla laskennallisilla ajouraverkostoilla



Aineisto

- AATU-menetelmän pilotointiaineistona käytettiin Metsätehon omistajien toteuttamia ensiharvennuskohteita vuosilta 2017 – 2021.
 - Kohteet sijaitsivat Etelä-Suomesta aina Lapin eteläosiin asti.
 - Kohteilta oli käytettävissä StanForD-standardin mukaiset hpr-tiedostot (Skogforsk 2025).
 - Hakkuukoneissa ei ole ollut käytettävissä tarkkuuspaikannusta.
- Kohteille laskettiin kuviorajaukset sekä ajouraverkostot ja niiden tunnusluvut hakkuukoneen sijaintitiedon perusteella (Melkas ym. 2020, Ovaskainen & Riecki 2022).
 - Ajouratunnuksista määritettiin ajouratiheys (m/ha), ajouravälin keskiarvo (m) ja keskihajonta (m), ajouravälijakauman moodi (m, 0,5 m tarkkuudella) ja uravälihavaintojen lukumäärä (kpl).
 - Kuvioille laskettiin muotoparametri neliön suhteen (kts. seur. dia).
 - Aineistoon lisättiin myös hehtaarikohtaiset poistuman runkoluvut.
- Pilotointiaineisto sisälsi yhteensä 1 234 kuviota.
 - Kuvioden pinta-ala oli vähintään yksi hehtaari.



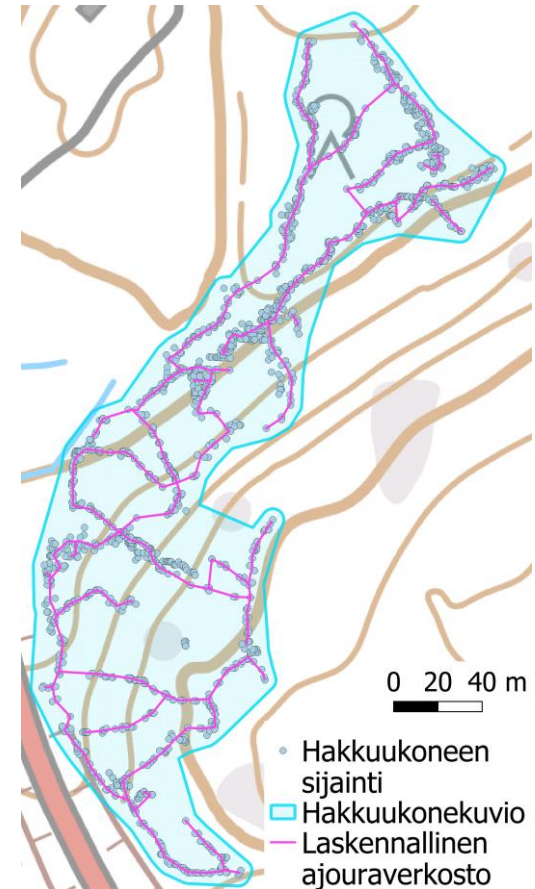
Esimerkki AATU-pilotoinnin aineistosta. Hakkuukonekuvion aluerajaus ja laskennallinen ajouraverkosto on tuotettu hakkuukoneen sijainneista.

Menetelmä: muotoparametri

- Hakkuukonekuvioille laskettiin muotoparametrin arvot neliön suhteen (Forman & Godron 1986).
- Muotoparametri kuvaa, kuinka paljon aluerajaus muistuttaa vertailtavaa muotoa.
 - Neliön muotoparametri on 1.
 - Mitä enemmän muotoparametrin arvo kasvaa yli arvon 1, sitä epäsäännöllisempi kuvion muoto on.
 - Ympyrän muotoparametri neliön suhteen on noin 0,89.

$$\text{neliö} : \frac{p}{4\sqrt{A}}$$

Muotoparametrin lauseke, jossa
 p = kuvion piiri ja
 A = kuvion pinta-ala.



Kuvan kohteella (2,9 ha) muotoparametri neliön suhteen on 1,61.

Menetelmä: AATU-hakuehdot

- Mahdollisesti poikkeavia ajouraverkostoja ensiharvennuskohteilta haettiin pilotoinnissa seuraavasti:
 - Joko ajourien välinen keskimääräinen etäisyys tai moodi oli yli 23 metriä tai alle 17 metriä.
 - Suosituksia selvästi suuremmat ajouravälit saattavat tarkoittaa, että väliin on voinut jäädä harventamaton alue.
 - Tai ajouravälin keskihajonta oli yli 6,5 metriä.
 - Sekä kuvion pinta-alan tuli olla yli 1 hehtaari.
- Pilottiaineiston laskennallisista ajouraverkostoista löydettiin 370 kpl (n. 30 %) hakuehdot täyttävää kuviota.

Menetelmä: poikkeavien korjuukohteiden taustatekijöiden selvitys

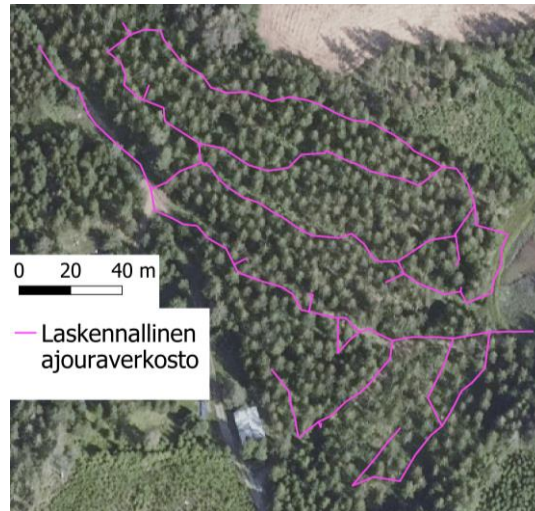
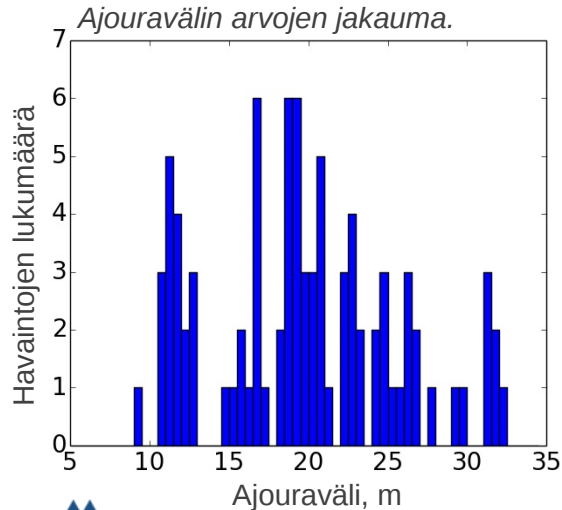
- Hakuehdot täyttäneistä korjuukohteista valittiin satunnaisesti 165 kpl manuaaliseen tarkasteluun paikkatieto-ohjelmaan. Kohteilta arvioitiin sekä visuaalisesti että ajouratunnusten perusteella, oliko toteutettu ajouraverkosto metsänhoidon suositusten mukainen.
- Suositusten mukaisiksi arvioitiin 51 kohdetta ja suosituksista poikkeaviksi 114 kohdetta.
- Suosituksista poikkeaville kohteille etsittiin selittäviä taustatekijöitä kuvion muodon ja koon sekä seuraavien Maanmittauslaitoksen avoimien aineistojen perusteella:
 - ortoilmakuvat (havaittiin puuston tiheysvaihteluja sekä kunnostusojituksia, joita varten oli avattu ojalinjoja hakkuulla),
 - peruskartta (havaittiin mm. korkeuseroja ja ojia kuvion alueella tai sen välittömässä läheisyydessä),
 - kiinteistörajat ja
 - rinnevarjoste (havaittiin mm. pienipiirteisempiä korkeuseroja, mitä peruskartalta nähdään).
- Läpikäynnin apuna käytettiin laskennallisten kuviorajausten ja ajouraverkostojen lisäksi hakkuukoneen sijaintipisteitä korjuukohteella.
- Subjektiiivisuuden vähentämiseksi poikkeavien kohteiden arviointiin osallistui tarvittaessa koko työryhmä.

Tulokset: suositusten mukainen ajouraverkosto

- Osalla kohteista arvioitiin manuaalisen ja visuaalisen tarkastelun perusteella olevan suositusten mukainen ajouraverkosto, vaikka kohde olikin täyttänyt jonkin hakuehdon.
- Tällaisia kohteita oli yhteensä 51 kpl (31 %) läpikäydyistä kohteista.
- Kohteiden ajouratunnuksista poikkesi tyypillisesti vain yksi tunnus mm. seuraavasti:
 - Keskimääräinen ajouraväli tai sen moodi ylitti raja-arvon 23 m.
 - Ajouravälin keskihajonta ylitti raja-arvon 6,5 m.
 - Keskimääräinen ajouraväli oli suositusten mukainen, mutta ajouraväliarvojen moodi alitti suositusten mukaisen arvon useammalla metrillä. Tällöin kuvio on tyypillisesti ollut kaksiosainen, ja eri osissa ajouraverkoston uraväli on erilainen.

Esimerkki: suositusten mukainen ajouraverkosto

- Ajouravälin keskiarvo kohteella on 19,8 m ja uravälin keskihajonta 5,9 m.
 - Koko alue näkyy ilmakuvassa kauttaaltaan harvennettuna.
 - Kohteen eri osissa ajouravälit vaihtelevat, mikä kasvattaa niiden keskihajontaa, mutta keskiarvo pysyy kuitenkin suositusten mukaisena.
 - Pieni osa kohteesta on ojitettu, joten yksi ajouraväli on kapeampi.



METSÄTEHON TULOSKALVOSARJA 3/2025



Tulokset: poikkeavien kohteiden taustatekijät

- Jonkin tunnuksen perusteella suositusarvoista poikkeavia ajouraverkostoja löydettiin 114 kpl (69 % läpikäydyistä kohteista).
- Suurimmalle osalle poikkeavista kohteista (110 kpl, 96 %) löytyi looginen selittävä tekijä tarkasteltujen aineistojen perusteella.
 - Joillekin kohteille löytyi useampia selittäviä taustatekijöitä, esimerkiksi maaston korkeuserot kohteella heikentävät usein myös hakkuukoneen paikannustarkkuutta.
→ Tuloksissa huomioitiin jokaiselle kohteelle yksi, ensisijainen ajouraverkoston rakenteeseen vaikuttava tekijä.
- Ajouraverkoston poikkeavaa rakennetta selittäviä syitä ei pystytty päättämään neljälle kohteelle.
 - Näistä kaksi pystyttiin maastotarkastamaan tämän työn puitteissa.

Poikkeavaa laskennallista ajouraverkostoa selittävät taustatekijät tutkimuksen aineistossa.

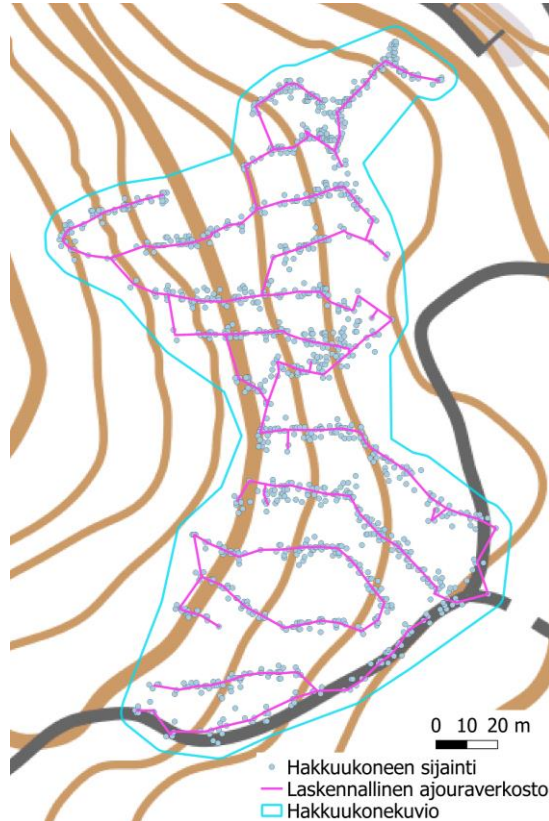
Taustatekijä	Kohteiden lukumäärä
Maaston korkeuserot	53
Oja, ojitus, kosteikko	28
Kuvion geometria	17
Hakkuukoneen paikannusepä tarkkuus	4
Muu syy (puusto, tie)	8
Ei selitystä	4
Yhteensä	114

Tulokset: maastotarkastetut poikkeavat kohteet

- Maastotarkastus tehtiin kahdelle kohteelle, joille ei löydetty ajouraverkoston poikkeamia selittäviä taustatekijöitä paikkatietoaineistoista.
- Maastotarkastus toteutettiin kävelemällä ajouraverkostoa läpi ja havainnoimalla samalla maastonmuotoja, ojitusta, hakkuujälkeä ja ajourien leveyttä.
 - Erityisesti havainnoitiin paikkatietoaineistoista puuttuvia oja, luontokohteita ja puuston laatua.
 - Maastotarkastuksen yhteydessä kohteelta otettiin valokuvia ja kirjattiin muistiinpanoja. Kuljettu reitti tallennettiin matkapuhelimen Sports Tracker -sovelluksella.
- Maastotarkastusten havainnot:
 - Ensimmäisellä kohteella tavanomaista leveämmässä ajouravälissä sijaitsi kosteikko, jolla oli pienempi puusto ja joka oli jätetty harventamatta. Lisäksi kohteella oli peruskartasta puuttuva oja, jonka vartha oli seurattu hakkuussa.
 - Toinen kohde, kuusikko, sijaitsi melko jyrkässä rinteessä. Hakkuutapa oli poikkeava, sillä ajourat olivat noin 5 m leveät ja urien väliä oli harvennettu hyvin kevyesti. Kuvia kohteesta on seuraavalla dialla.

Esimerkki: maastotarkastettu poikkeava kohde

- Kohteen ajouravälin keskiarvo oli 18,0 m, moodi 16,0 m ja keskihajonta 6,1 m.
- Kohde sijaitsee rinteessä, mutta se ei yksin selittäne suosituksiin nähden matalampaa keskimääräistä ajouraväliä.
- Maastotarkastuksessa ilmeni, että
 - ajourat olivat noin 5 m leveät ja
 - ensiharvennus oli toteutettu harventamalla puustoa pääasiassa vain ajourilta.



Maastotarkastettu poikkeava kohde.
Peruskartta ja ilmakuva ©
Maanmittauslaitos.

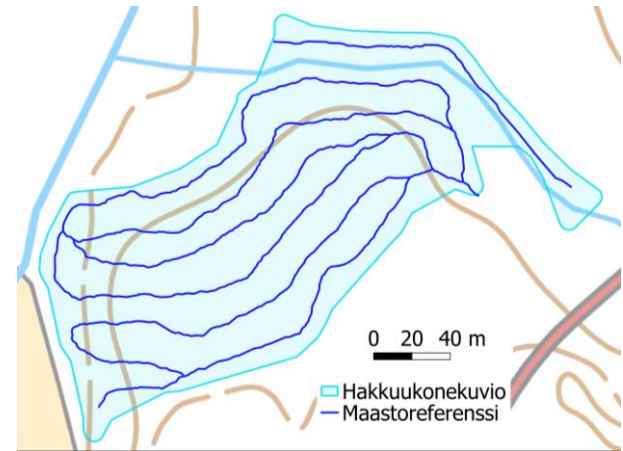
Ajouraverkostojen referenssit ja niiden ajouratunnukset

Ajouraverkostojen referenssiaineistot

- Referenssillä tarkoitetaan laskennalliseen ajouraverkostoon verrattavaa ajouraverkostoa, joka on laadittu saman korjuukohteen verkostosta joko maastossa kartoittamalla tai ilmakuvasta digitoimalla.
 - Referenssien digitointi ilmakuvilta on huomattavasti kustannustehokkaampaa kuin maastokartoitus.
- Referenssiajouraverkostojen ajouratunnusten selvittäminen on oleellista AATU-menetelmän käyttökelpoisuuden arvioinnissa
 - sekä suositusten mukaisiksi arvioiduille kohteille, että
 - jollakin tapaa poikkeaviksi arvioiduille kohteille.
- Myös ajouraverkostojen välistä sijaintivastaavuutta tutkittiin:
 - kuinka hyvin ilmakuvilta digitoidut ajouraverkostot vastaavat maastoreferenssejä ja
 - kuinka hyvin laskennalliset ajouraverkostot vastaavat molempia referenssejä.
 - → Kun tunnetaan ajouraverkostojen sijaintivastaavuus, voidaan arvioida myös ajouratunnusten luotettavuutta.
 - Maastoreferenssiä pidettiin todenmukaisimpana aineistona.
- Kaikki yllä mainitut analyysit tehtiin QGIS-paikkatieto-ohjelmalla.
- Lisäksi referenssiaineistolle laskettiin muuttujien väliset korrelaatiot SPSS-ohjelmalla.

Aineisto: maastoreferenssit

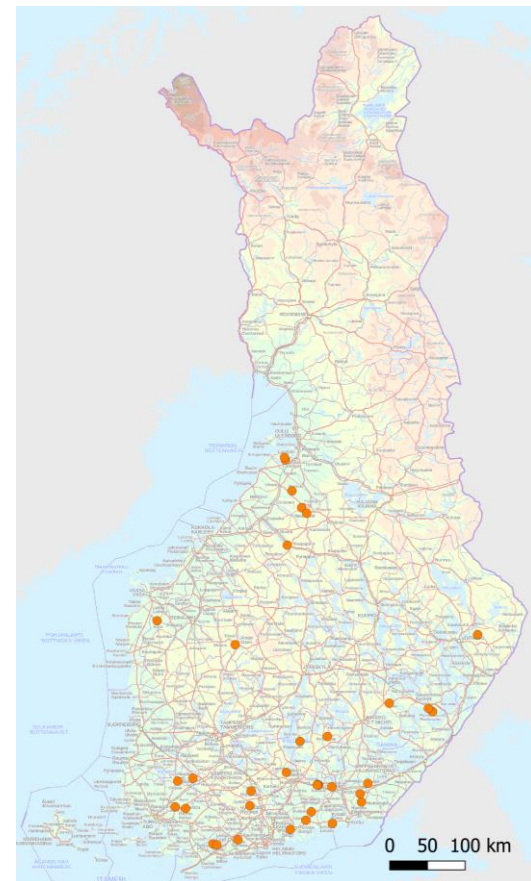
- Maastokartoituskohteita valittiin sijainnin ja saavutettavuuden perusteella yhteensä 11 kpl, joista 7 kpl oli poikkeavia ja 4 kpl suositusten mukaisia.
 - Kohteet sijaitsivat noin 100 kilometrin säteellä pääkaupunkiseudulta.
- Maastokartoitukset tehtiin GNSS-tarkkuuspaikannuslaitteella.
 - Kartoitukseen käytettiin GNSS-vastaanotinta Trimble R12i, Trimble T100 -maastotietokonetta ja Trimble Access -ohjelmistoa.
 - Paikannuslaite tallensi sijainnin, kun etäisyys oli muuttunut yhden metrin tai aikaa oli kulunut 5 sekuntia edellisen sijainnin tallentamisesta.
 - Valmistajan ilmoittama paikantimen nimellistasotarkkuus oli mittauksissa pääosin alle 5 cm, ja vähimmilläänkin alle 10 cm.
- Kohteen kaikki havaitut ajourat kartoitettiin läpi uran keskikohtaa kulkien.
- Kartoitusten jälkeen maastoaineistot käsiteltiin paikkatieto-ohjelmassa sijaintipisteistä viivamuotoisiksi ajouraverkostoiksi.



*Esimerkki maastokartoitetusta ajouraverkostosta.
Keskimääräinen ajouraväli 17,5 m, moodi 18 m
ja keskihajonta 3,2 m. Ajouratiheys 607 m/ha.
Peruskartta © Maanmittauslaitos.*

Aineisto: ilmakuvareferenssit

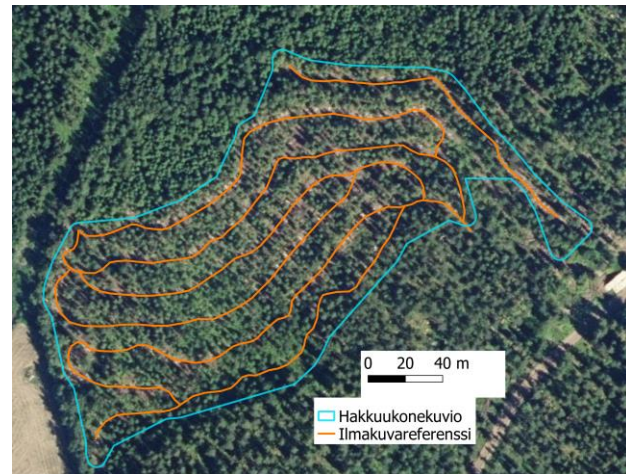
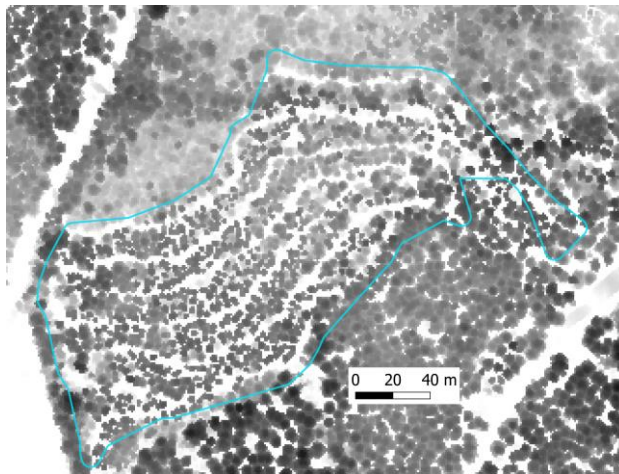
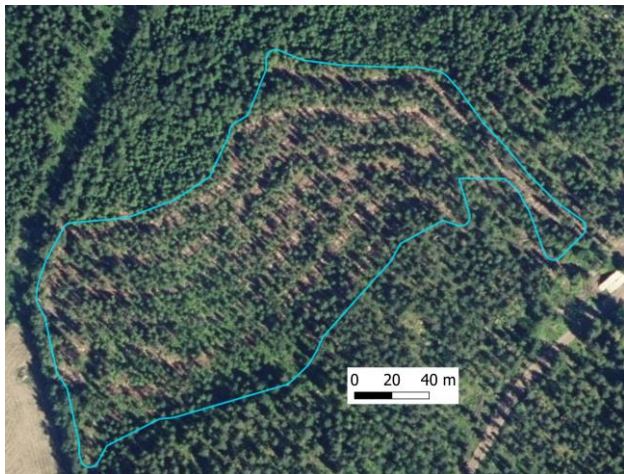
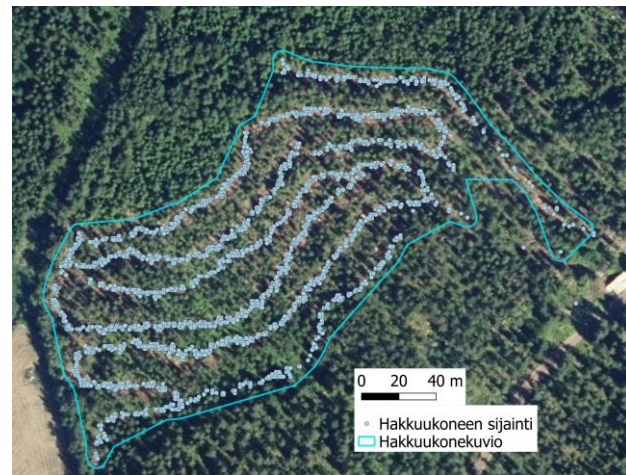
- Ajouraverkoston ilmakuvareferenssit digitoitiin sellaisilta kohteilta, joilta ajourat pystyttiin visuaalisesti havaitsemaan avoimista paikkatietoaineistoista.
 - Ajourien täytyi erottua selkeästi koko hakkuualueelta.
- Aineistoina käytettiin Maanmittauslaitoksen ortoilmakuvaa, vääräväri-ilmakuvaa ja rinnevarjostetta sekä Suomen metsäkeskuksen latvusmallia.
 - Ortoilmakuvan sijaintitarkkuus on 0,5 m – 2 m riippuen mm. sen laskennassa käytetystä korkeusmallista (Maanmittauslaitoksen ortokuva, 2025).
- Hakkuukoneen sijaintitietojen avulla varmistettiin, että referenssiin digitoitiin kaikki sellaiset ajourat, joilta oli kaadettu puita.
- Digitointi suoritettiin paikkatieto-ohjelmassa piirtämällä manuaalisesti ajouraverkostoa kuvaavat viivat, joiden sijainti pyrittiin kohdistamaan ajourien keskilinjalle.
 - Subjektiivisuuden vähentämiseksi kaikki kohteet digitoi kaksi henkilöä.
- Hakkuukohteita, joilta tallennettiin joko maasto- tai ilmakuvareferenssi, oli yhteensä 36 kpl.
 - Maastoreferenssejä tallennettiin 11 kpl.
 - Ilmakuvareferenssejä digitoitiin yhteensä 32 kappaletta.
 - Seitsemältä hakkuukohteelta tallennettiin molemmat referenssit.



Ilmakuvareferenssien maantieteellinen sijainti. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Esimerkki: ilmakuvareferenssi

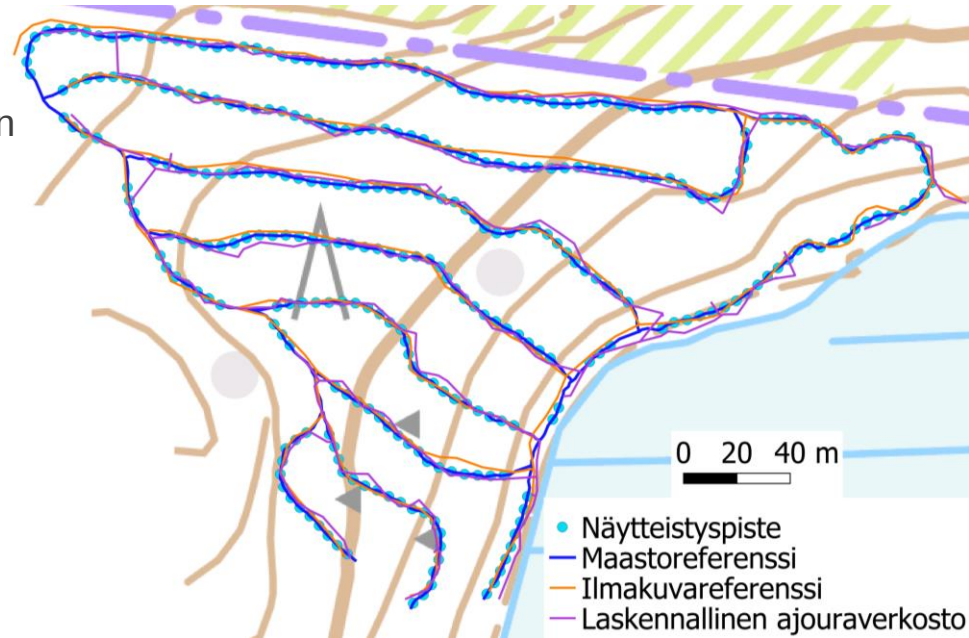
- Kohteen ajourat erottuivat ilmakuvalta verrattaen hyvin.
- Kohteella havaittiin poikkeava, harvempi puusto.
- Digitoidun ajouraverkoston ajouravälin keskiarvo oli 17,2 m, moodi 17 m ja keskihajonta 3,1 m. Ajouratiheys oli 601 m/ha.



Menetelmä: ajouraverkostojen sijaintivastaavuus

- Laskennallisten ajouraverkostojen ja referenssien välistä sijaintivastaavuutta tutkittiin määrittämällä ajouraverkostojen kohtisuorat etäisyydet.
 - Etäisyyden näytteistyspisteet sijoitettiin ajourille tasavälein (5 m).
 - Ajouraverkostojen risteyskohdat tunnistettiin etäisyyden (8 m) perusteella risteyskeskipisteestä ja jätettiin pois näytteistyksestä.
- Etäisyyksille laskettiin keskineliövirheen neliöjuuret eli RMSE-arvot.
 - Näin ollen tulokseen ei vaikuta se, kummalle puolelle referenssiä siirtymä on.

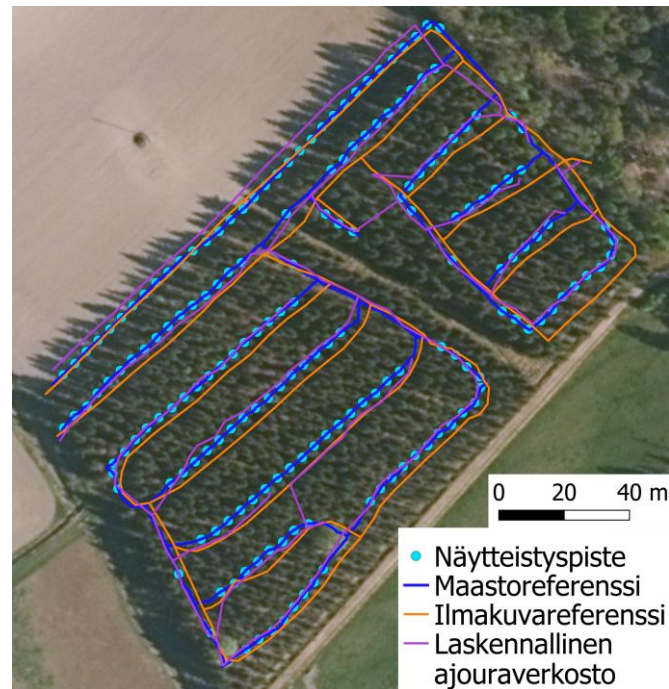
Aineistopari	Sijainnin RMSE-arvo, m
Laskenn. ura vs. maastoref.	1,8
Ilmakuvaref. vs. maastoref.	1,8
Laskenn. ura vs. ilmakuvaref.	2,4



Esimerkki yhden kohteen (3,9 ha) eri ajouraverkostoista ja niiden välisen etäisyyden näytteistyspisteistä. Ajouraverkostojen väliset sijainnin RMSE-arvot ovat oheisessa taulukossa. Kohteella ajouraverkostojen vastaavuus on hyvä. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Tulokset: ajouraverkostojen sijaintivastaavuus

- Ilmakuvareferenssit poikkesivat maastoreferensseistä keskimäärin lähes kaksi metriä.
- Myös laskennallisten ajouraverkostojen sijainti poikkesi molemmista referensseistä keskimäärin hieman yli kaksi metriä.
- Sijainnin RMSE-arvot vaihtelivat kohteittain noin 1 – 4 m välillä.
- Tulokset vertautuvat hyvin aiempaan tutkimukseen (Ovaskainen & Riekkilä 2022).



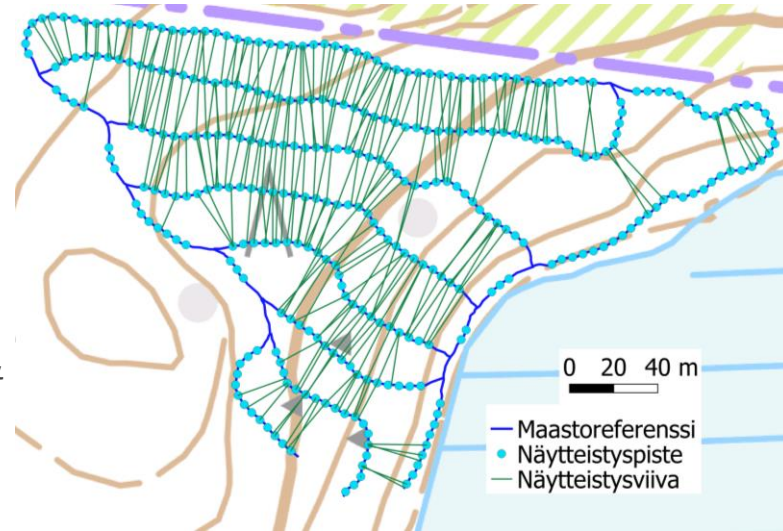
Kohteittain määritettyjen ajouraverkostojen välisten sijainnin RMSE-arvojen keskiarvot ja keskihajonnat sekä sijainnin näytteistyspisteiden määrä.

Aineistopari	Kohteiden määrä, kpl	Sijainnin RMSE-arvojen keskiarvo, m	Sijainnin RMSE-arvojen keskihajonta, m	Etäisyyden näytteistyspisteitä, kpl/ha
Laskenn. urat vs. maastoref.	11	2,3	0,7	74
Ilmakuvaref. vs. maastoref.	7	1,9	0,8	86
Laskenn. urat vs. ilmakuvaref.	32	2,2	0,7	82

Kuvassa esimerkki kohteen (2,0 ha) eri ajouraverkostoista ja niiden välisen etäisyyden näytteistyspisteistä. Ajouraverkostojen väliset sijainnin RMSE-arvot ovat 2,0 m, 3,2 m ja 3,5 m oheisen taulukon järjestyksessä. Ilmakuva © Maanmittauslaitos.

Menetelmä: referenssien ajouratunnusten laskenta

- Referenssiajouraverkostoille määritettiin ajouratunnukset (kts. dia [10](#)).
 - AATU-pilotoinnin aikana ajouravälin näytteistysmenetelmän yksityiskohtia oli päivitetty.
 - Hakkuukoneaineiston (N = 1234) poikkeavien kohteiden AATU-haku tehtiin julkaisun Ovaskainen & Rieki (2022) mukaisilla ajouratunnuksilla.
 - Referenssien (N = 36) ajouratunnukset laskettiin päivitetyllä näytteistysmenetelmällä.
- Myös referenssikohteiden laskennallisille ajouraverkostoille määritettiin vertailukelpoiset ajouratunnukset päivitetyllä menetelmällä (kts. seur. dia).



Esimerkki maastoreferenssin ajouravälin näytteistyksestä. Näytteistuspisteet sijoitettiin ajouralle 5 m välein, pois lukien risteysalueet. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Menetelmä: uravälinäytteistysten päivitys

- Referenssikohteille määritettiin laskennallisten ajouraverkostojen ajouratunnukset ennen ja jälkeen uravälien näytteistysten päivitystä.
- Uravälinäytteistystä päivitettiin uraviivojen käytön sijaan enemmän etäisyyksiin perustuvaksi:
 - Etäisyyden näytteistyspisteet sijoitettiin ajourille tasavälein (5 m), kun aiemmin käytettiin uraviivojen keskipisteitä.
 - Ajouraverkostojen risteykset rajattiin pois näytteistyksestä etäisyyden (8 m) perusteella risteyksen keskipisteestä.
 - Näytteistysviivojen kohtaamiskulmaa ajouraviivojen kanssa rajoitettiin.
 - Myös kaksipuoleisen näytteistysten etäisyyksien keskiarvoistamisen sijaan molemmat etäisyydet lisättiin erillisinä.
- Päivitysten seurauksena keskimääräinen ajouraväli pieneni tässä aineistossa noin yhden metrin verran.

Referenssikohteiden laskennallisten ajouraverkostojen ajouratunnukset ryhmiteltynä selittävien taustatekijöiden mukaisesti.

Arvio kohteen ajouraverkostosta	Kohteiden määrä, kpl	Aiempi näytteistys			Päivitetty näytteistys		
		Keskiarvo, m	Keskihajonta, m	Moodi, m	Keskiarvo, m	Keskihajonta, m	Moodi, m
Suosittelun mukainen	11	22,6	4,9	22,6	21,6	4,0	21,1
Maaston korkeuserot	9	20,4	6,3	19,7	19,7	5,1	18,3
Oja, ojitus, kosteikko	8	21,8	5,5	19,9	20,3	4,3	19,4
Kuvion geometria	3	20,9	5,6	18,5	20,2	4,7	19,8
Hakkuukoneen paikannusepätkä	1	17,0	6,2	10,5	16,1	7,2	15,5
Muu selittävä tekijä	3	18,8	4,7	16,2	17,7	4,7	16,5
Poikkeama, ei selitystä	1	19,9	5,7	16,0	18,8	4,7	17,0
Kaikki kohteet	36	21,2	5,5	19,9	20,2	4,6	19,3



Tulokset: referenssikohteiden ajouratiheydet

- Kohteiden ajouratiheydet (m/ha) eri aineistoissa vastasivat toisiaan pääosin hyvin.
 - Maastoreferensseillä oli eniten aineiston sisäistä vaihtelua, mikä voi johtua pienestä näytemäärästä.
 - Kaikkien aineistojen ajouratiheyksien laskennassa käytettiin hakkuukonekuvioiden pinta-alaa.

Pearsonin korrelaatiokertoimet eri aineistojen ajouratiheyksien välillä. Lisäksi kohteiden lukumäärät.

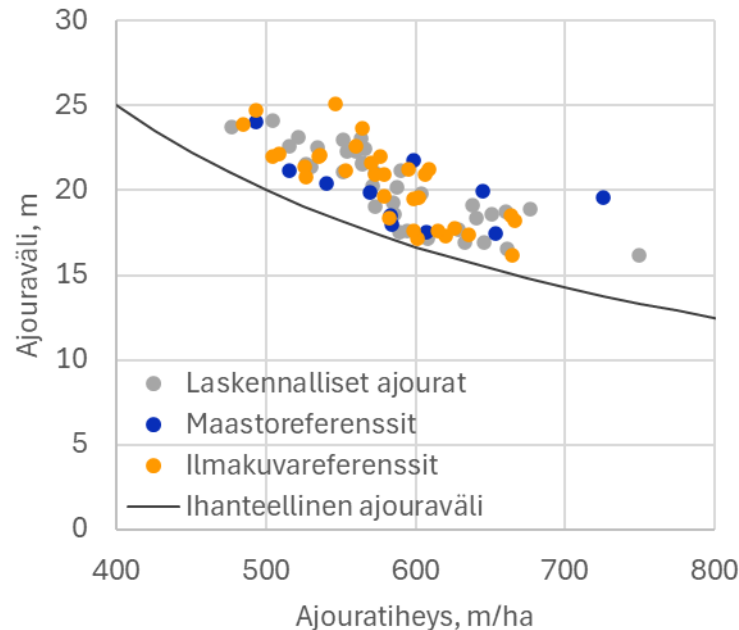
Aineisto	Laskennalliset ajourat	Maasto-referenssit	Ilmakuva-referenssit
Laskennalliset ajourat	1		
Maasto-referenssit	0,84 11 kpl	1	
Ilmakuva-referenssit	0,77 32 kpl	0,96 7 kpl	1

Ajouratiheyden keskiarvot ja keskihajonnat eri aineistoissa. Huomaa vaihteleva kohteiden määrä.

Aineisto	Kohteiden määrä, kpl	Keski-arvo, m/ha	Keski-hajonta, m/ha
Laskennalliset ajourat	36	587	55
Maasto-referenssit	11	592	63
Ilmakuva-referenssit	32	578	48

Tulokset: referenssikohteiden ajouratiheydet

- Ajouratiheydet ja ajouravälit riippuivat toisistaan melko säännönmukaisesti.
 - Osalla kohteista ajouraverkoston ajouratiheys ja ajouraväli olivat lähes ihanteellisia.
 - Aineistolle tyypillinen ajouratiheyden vaihteluväli oli alle 500 m/ha:sta yli 650 m/ha:iin asti.
- Referenssikohteiden ajouravälit on esitetty seuraavalla dialla ja tärkeimmät ajouratunnukset on koottu taulukkoon dialle [31](#).



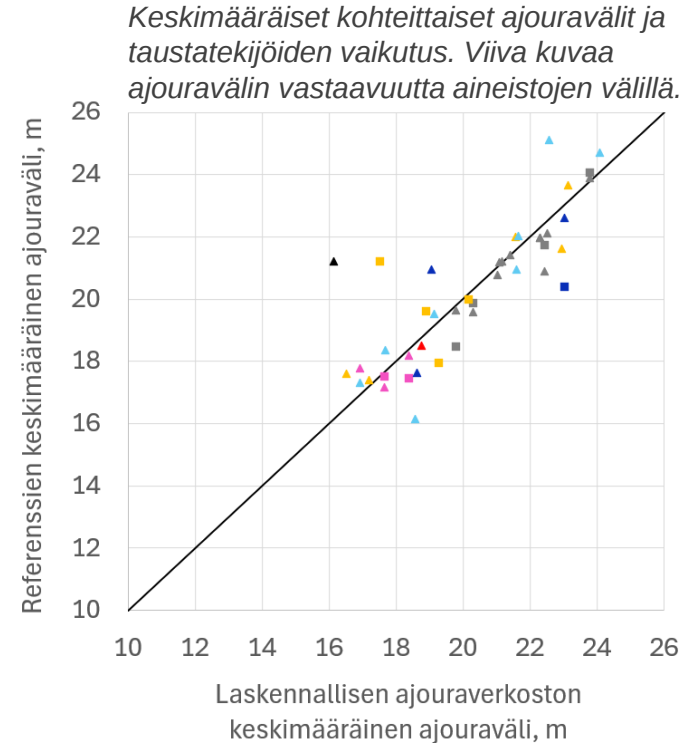
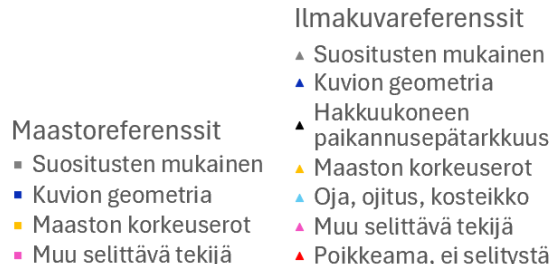
Ajouravälit ajouratiheyden mukaan.
Ihanteellinen ajouraväli on laskettu seuraavasti:
$$\text{uraväli (m)} = 10000 / \text{uran määrä (m/ha)}$$

Tällöin 500 m/ha uraa vastaa 20 m ajouraväliä.

Tulokset: referenssikohhteiden ajouravälit

Laskennallisten ajouraverkostojen keskimääräisten ajouravälien vastaavuus referensseihin nähden:

- Suurimmalla osalla kohteista uravälit poikkesivat noin metrin suuruusluokassa.
 - Suositusten mukaisilla ajouraverkostoilla uravälin vastaavuus oli erityisen selkeää.
 - Laskennallisten ajouraverkostojen tulokset olivat lievä yliarvio referensseihin nähden.
- Muutamilla kohteilla, joilla maaston korkeusero, ojat tai kuvion muoto vaikuttivat ajouraverkostoon, uravälit poikkesivat enemmän.
- Poikkeavuus oli kaikkein selkein hakkuukoneen paikannusepä-tarkkuuden kohteella.



Tulokset: referenssikohteiden ajouratunnukset

Referenssikohteiden ajouraverkostojen ajouratiheydet sekä uravälin keskiarvot ja keskihajonnat. Ajouraverkostoltaan poikkeaviksi arvioidut kohteet on ryhmitelty taulukkoon selittävien taustatekijöiden mukaisesti. N = kohteiden määrä.

Arvio kohteen ajoura-verkostosta	Laskennalliset ajouraverkostot					Maastoreferenssit					Ilmakuvarreferenssit				
	N, kpl	Keski-arvo, m	Keski-hajonta, m	Moodi, m	Uraa, m/ha	N, kpl	Keski-arvo, m	Keski-hajonta, m	Moodi, m	Uraa, m/ha	N, kpl	Keski-arvo, m	Keski-hajonta, m	Moodi, m	Uraa, m/ha
Suosittelun mukainen	11	21,6	4,0	21,1	555	4	21,0	4,2	21,3	561	11	21,3	3,6	21,6	554
Maaston korkeuserot	9	19,7	5,1	18,3	590	4	19,7	4,6	19,4	617	5	20,5	3,0	19,3	575
Oja, ojitus, kosteikko	8	20,3	4,3	19,4	589	-	-	-	-	-	8	20,5	3,7	19,5	577
Kuvion geometria	3	20,2	4,7	19,8	574	1	20,4	5,4	25,0	540	3	20,4	4,2	23,0	584
Hakkuukoneen paikannus-epätarkkuus	1	16,1	7,2	15,5	750	-	-	-	-	-	1	21,2	3,5	20,5	609
Muu selittävä tekijä	3	17,7	4,7	16,5	623	2	17,5	3,5	19,0	630	3	17,7	3,5	17,5	631
Poikkeama, ei selitystä	1	18,8	4,7	17,0	660	-	-	-	-	-	1	18,5	4,4	17,0	664
Kaikki kohteet	36	20,2	4,6	19,3	587	11	19,9	4,3	20,5	592	32	20,5	3,6	20,3	578



Tulokset: hakkuukonekuvioiden muotoparametrit

- Kuvion muodon yhteyttä ajouraverkoston poikkeamiin selvitettiin muotoparametrin avulla.
- Referenssiaineiston tulosten perusteella suositusten mukaiset ajouraverkostot sijaitsivat tyypillisesti säännöllisen muotoisilla kuvioilla, joilla muotoparametrien arvot ovat lähellä arvoa 1.
- Maasto-olosuhteiden vuoksi poikkeavilla ajouraverkostoilla kuvioiden muodot olivat jossakin määrin epäsäännöllisempiä.
- Kuvion geometriasta johtuvien poikkeamien kohteilla muotoparametrien keskiarvo oli suurin.

Referenssiaineiston hakkuukonekuvioiden keskimääräiset muotoparametrit neliön suhteen.

Arvio kohteen ajouraverkostosta	Kohteiden määrä, kpl	Muotoparametrien keskiarvo
Suosituksen mukainen	11	1,17
Maaston korkeuserot	9	1,33
Oja, ojitus, kosteikko	8	1,26
Kuvion geometria	3	1,48
Hakkuukoneen paikannusepätkä	1	1,42
Muu selittävä tekijä	3	1,15
Poikkeama, ei selitystä	1	1,17
Kaikki kohteet	36	1,26

Tulokset: korrelaatioanalyysi

- Referenssiaineiston kaikkien muuttujien välisistä Pearsonin korrelaatiokertoimista havaittiin pääosin ennalta tunnettuja korrelaatioita ajouratunnusten välillä.
 - Nämä on esitetty edellisten diojen tuloksissa.
- Uutena havaintona ilmeni negatiivinen korrelaatio ($r = -0,40$, $p = 0,025$) poistuman hehtaarikohtaisen runkoluvun ja ilmakuvareferenssien ajouravälien keskihajonnan välillä.
 - Poistuman kasvaessa jäävät puut aiheuttavat ilmeisesti vähemmän katvetta ilmakuviin. Tällöin ajouraverkosto erottuu paremmin ja on myös tarkemmin digitoitavissa ilmakuvilta, jolloin ajouravälien tarkkuudet paranevat.

Yhteenveto



Tulosten yhteenveto: AATU-menetelmän toiminta

- AATU-laskentamenetelmällä pystyttiin tunnistamaan mahdollisesti poikkeavia korjuukohteita hakkuukonetiedosta laskettujen ajouraverkostojen ajouratunnusten perusteella.
 - Löydettiin melko paljon myös metsänhoidon suositusten mukaisia kohteita.
 - Poikkeavien kohteiden rajausehdoissa on vielä säätämisen tarvetta.
 - Ajouraverkoston keskimääräinen ajouraväli voi olla laadukkaasti toteutetussa harvennuksessa metsänhoidon suositusten arvoa suurempikin.
- Hyvin suurelle osalle (96 %) poikkeamakohteista löydettiin perusteltu syy paikkatietoaineistojen avulla.
 - Selittävinä tekijöinä olivat useimmin maaston korkeuserot sekä ojat. Myös mm. korjuukohteen aluerajauksen geometria eli muoto ja koko selittivät poikkeamia.
 - Maasto-olosuhteet voivat rajoittaa merkittävästi ajourien sijoittamista kohteelle. Tällöin suosituksista poikkeava ajouraverkosto on perusteltavissa.
- Kuljettajan osaamattomuudesta tai tarkoituksellisista laiminlyönneistä johtuvia poikkeamia ei havaittu tämän työn aineistossa.



Tulosten yhteenveto: ajouraverkostojen osuvuus

- Laskennallisten ajouraverkostojen sijaintitarkkuutta voidaan pitää riittävänä ajouratunnusten määrittämiseen.
 - Tämä voidaan havaita ajouratunnusten hyvänä vastaavuutena referensseihin nähden.
- Korjuukohteen maasto-olosuhteita kuvaavat ym. taustatekijät heijastuivat sekä laskennallisten että referenssiajouraverkostojen tunnuksiin samankaltaisesti. Tämä havaittiin eritoten poikkeavilla ajouraverkostoilla (kts. dia [31](#)).
- Vain yhdellä kohteella laskennallisen ajouraverkoston tunnuksiset poikkesivat huomattavasti referensseistä. Tällöin hakkuukoneen paikannusepä-tarkkuus vaikutti laskennalliseen ajouraverkostoon.
 - Jatkuvasti tarkentuva hakkuukoneen sijainnin paikannus kasvattaa laskennallisten ajouraverkostojen osuvuutta ja sitä kautta myös AATU-menetelmän tarkkuutta.
 - Tämän tutkimuksen aineistossa ei vielä ollut mukana uusimpia, tarkkuuspaikannettuja hakkuukoneita.
- Lisäksi voitiin todeta, että ilmakuvareferenssit ovat käytännössä likimain maastoreferenssien tasoista tietoa toteutetuista ajouraverkostoista, kun digitointi on tehty huolellisesti.
 - Aineistojen nimellisissä sijaintitarkkuuksissa on hieman eroa maastoreferenssien eduksi.
 - Digitointiin voi aiheutua epätarkkuuksia esimerkiksi ilmakuvalla näkyvien puiden varjojen ja vinon kuvaussuunnan takia.



Johtopäätökset

- Poikkeavien kohteiden haku voidaan toteuttaa ajouratunnusten perusteella.
 - Hakua on myös mahdollista kehittää edelleen tarkentamalla AATU:n rajausehtoja.
- Hakkuukoneen sijaintitiedosta tuotettujen laskennallisten ajouraverkostojen ajouratunnukset toimivat hyvin lähtötietona AATU-menetelmälle.
- Ajouraverkostoihin poikkeamia aiheuttavat taustatekijät pystytään tunnistamaan merkittävälle osalle kohteita avoimien paikkatietojen avulla.
 - Tämä vähentää maastotarkastusten tarvetta.
- Poikkeavia kohteita selittävien tekijöiden läpikäynti avoimista aineistoista voidaan automatisoida jatkossa.
 - Tärkeimmät avoimet aineistot AATU-menetelmän kannalta ovat Maanmittauslaitoksen maastotietokanta ja Suomen metsäkeskuksen metsävaratiedot.

→ AATU- eli automaattinen ajourien laadunseurantamenetelmä toimi pilotoinnissa hyvin ja on erittäin potentiaalinen käytettäväksi osana puunkorjuun laadun automaattista omavalvontaa.



Viitteet

- Arponen M-S (2024) Ajouraverkostojen laadun seuranta automaattisten ajouratunnusten avulla. Ammattikorkeakoulun opinnäytetyö, Metsätalouden koulutusohjelma, Hämeen Ammattikorkeakoulu, Hämeenlinna. Saatavissa: <https://www.theseus.fi/handle/10024/875700>.
- Forman R T T, Godron M (1986) Landscape Ecology. Cambridge.
- Maanmittauslaitoksen ortokuva (2025). Saatavissa: <https://www.maanmittauslaitos.fi/kartat-ja-paikkatieto/aineistot-ja-rajapinnat/tuotekuvaukset/ortokuva>. Viitattu 24.1.2025.
- Melkas T, Riekkilä K, Sorsa J-A (2020) Automated Method for Delineating Harvested Stands Based on Harvester Location Data. Remote Sens. 2020, 12(17), 2754. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/rs12172754>.
- 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 24.1.2025.
- Ovaskainen H, Riekkilä K (2022) Computation of Strip Road Networks Based on Harvester Location Data. Forests 2022, 13(5), 782. Saatavissa: <https://doi.org/10.3390/f13050782>.
- Skogforsk (2025) StanForD/StanForD 2010 Standard for Forest Machine Data and Communication. Saatavissa: <http://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>. Viitattu 24.1.2025.
- Sorsa J-A, Riekkilä K, Malinen J (2025) Hakkuukonetietoihin perustuvat korjuun laadun laskentapalvelut SPAH ja AATU. Metsätehon tulosalvosarjan käsikirjoitus.
- Tapio Oy (2025) Metsänhoidon suositukset. Saatavissa <https://metsanhoidonsuosituks.fi/fi>. Viitattu 24.1.2025.
- Turunen J, Ovaskainen H (2018) Hiljainen tieto lähikuljetuksen ajourasuunnittelussa. Metsätehon tulosalvosarja 10/2018. Saatavissa: <https://www.metsateho.fi/hiljainen-tieto-lahikuljetuksen-ajourasuunnittelussa/>.
- Äijälä O, Koistinen A, Sved J, Vanhatalo K, Väisänen P (toim.) (2019) Metsänhoidon Suositukset. Tapion Julkaisuja; Tapio Oy: Helsinki, Finland, 2019. Saatavissa: https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon_suosituks_Tapio_2019.pdf. Viitattu 24.1.2025.



Kestävän metsätalouden todentaminen ja menetelmät - KESTOTÄSMÄ

- Tämä tutkimus on toteutettu osana Kestävän metsätalouden todentaminen ja menetelmät (KESTOTÄSMÄ) –hanketta, jota rahoittaa EU:n elpymis- ja palautumistukiväline (RRF).



Euroopan unionin rahoittama –
NextGenerationEU