

Metsäkoneiden ajouraverkoston luokittelu

Metsätehon tuloskalvosarja 6/2022

Janne Viljakainen, Itä-Suomen yliopisto

Heikki Ovaskainen, Kirsi Rieki ja Jukka Malinen, Metsäteho Oy

Tiivistelmä

- Hyvin suunnitellulla ja toteutetulla ajouraverkostolla hakkuukohteella saadaan minimoitua hakkuukoneen ja kuormatraktorin ajomatkat, korjuuvaurioiden määrä sekä verkoston kokonaispituus. Kohteeseen soveltuva ajouraverkosto mahdollistaa tuottavan ja turvallisen lähikuljetustyön.
- Ajouraverkoston muodostamisessa esiintyneitä ajotapoja on aiemmin kuvailtu keruu-ura-, kierto-, läpiajo- ja pistouramenetelmien avulla (Ovaskainen ym. 2019).
- Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko hakkuukohteen ajouraverkosto tunnistaa visuaalisesti ja luokitella johonkin ajotapamenetelmään hakkuukonetiedon avulla.
- Lisäksi tarkasteltiin ajotavan ja korjuun olosuhdetekijöiden välistä riippuvuutta sekä ajouratiheyksien (m/ha) eroja ajotapamenetelmien välillä. Taustamuuttujiksi valittiin hakkuukohteiden kantavuus, kaltevuus ja muita kohteiden ominaisuuksia kuvaavia tunnuksia.
- Aineistona käytettiin operatiivisten ensiharvennus- ja päätehakkuukohteiden hakkuukonetietoja sekä niistä laskennallisesti tuotettuja ajouraverkostoja (Ovaskainen & Riekkö 2022) ja hakkuukonekuvioita (Melkas ym. 2020). Kohteet olivat eri puolilta Suomea ja hakkuut oli toteutettu vuosina 2015–2021.
- Tutkimuksessa tunnistettiin aiemmin kuvailluista ajotapamenetelmistä poikkeava ajotapa nk. systemaattinen menetelmä.
- Taustamuuttuja-analyysissä pistouramenetelmä erottui muista ajotapamenetelmistä. Muiden ajotapamenetelmien väliltä ei löytynyt juurikaan eroja. Pistouramenetelmää käytettiin eritoten kaltevissa maastoissa. Kuvion keskihalkaisijan pituudella havaittiin myös olevan hieman vaikutusta ajotapamenetelmän valintaan.
- Ensiharvennuksilla ajouratiheydessä oli tilastollisesti merkitsevä ero keruu-uramenetelmän ja läpiajomenetelmän välillä keruu-uramenetelmän hyväksi. Päätehakkuilla ei havaittu tilastollisesti merkitseviä eroja ajouratiheydessä ajotapojen välillä.
- Jatkotutkimuksissa ajotapamenetelmien vaikutusta lähikuljetuksen kokonaisajomatkkaan sekä kohteelle soveltuvan ajotavan valintaan taustamuuttujien sekä muiden korjuukohdekohtaisten tekijöiden suhteen tulisi ottaa tarkempaan tarkasteluun.



Summary

- With a well-planned and implemented strip road network at the logging site, the driving distances of the harvester and forwarder, the amount of harvesting damage and the total length of the network can be minimized. A strip road network suitable for the site enables productive and safe extraction work.
- Strip road networks have been classified by Ovaskainen et al. (2019) as loop, go around, go around and through, and spur trail methods. A typical strip road network consists of a main logging trail and collecting trails. In Finland, the strip road networks are created during the harvesting by the harvester operator. The best practices of sustainable forest management (Äijälä et al. 2019) as well as e.g. the Finnish Forest Centre's trafficability map and terrain wetness map by Natural Research Institute Finland are taken account to locate the strip road network at harvesting site.
- Tools for predicting the optimal location of the main logging trail have been developed previously. Ovaskainen et al. (2019) presented "Ajourakone" and Willén et al. (2019) introduced "Bestway". In practice, the realised main logging trails and the strip road networks may differ from the predicted locations. To develop the tools further, more information is needed about how the realised strip road networks are actually created.
- The aim of this study was to investigate if the strip road creation methods can be visually identified and classified from the realised strip road networks.
- Additionally, the dependencies of the strip road method and the conditions at the harvesting sites were examined. The conditions at the site were described by background variables, which included characteristic variables of the strip road network, the growing stock at the stand and other site variables such as trafficability, slope, growth place type and soil type.
- Operative harvester data from first thinnings and regeneration fellings were used. The strip road networks and stand delineations were computed from the harvester location data (Ovaskainen & Riekkilä 2022, Melkas et al. 2020). The harvesting sites located at different regions of Finland and were harvested during years 2015–2021. The strip road method was identified for 169 first thinnings and 46 regeneration fellings.
- A new strip road creation method called systematic method was identified for the regeneration fellings. In systematic method, the harvesting is done back and forth between the edges of the stand. Main logging trail is not identified in this method.
- In the statistical analysis of the background variables, only the spur trail method differed significantly from the other methods. The spur trail method occurred especially at sites where terrain was steep (slope approx. 12 %). The mean diameter of the harvested stand, indicating the stand's shape, was found to have some statistical significance with the strip road method.
- At first thinnings, the strip road density (m/ha) was significantly differing between the loop and the go around and through methods.
- The results of the statistical analysis indicated, that the selection of the strip road method depends also on other factors than the background variables included here. For example, the preferences of the harvester operator and the extraction from the forest may affect to which strip road method is used.
- In the extraction of logs from the forest, the dependence of the forwarder driving times on the strip road method and density should be examined in more detail.



Taustaa: ajourasuunnittelun tavoitteet

- Koneellisen puunkorjuun yhteydessä metsään avataan ajourat metsäkoneiden työskentelyä ja liikkumista varten.
- Tehokkaassa puuhuollossa huomioidaan ajouraverkoston suunnitteluvaiheessa ajourien paras mahdollinen sijoittaminen ja verkoston tuottava käyttö lähikuljetuksessa hakkuukohteella.
- Ajouraverkoston sijoittamisen suunnitteluun on kehitetty opastavia sovelluksia. Suomessa päätehakkuille ja harvennuksille on kehitetty Ajourakone-sovellus (Ovaskainen ym. 2019) ja Ruotsissa päätehakkuille Bestway (Willén ym. 2019).
 - Molemmat sovellukset perustuvat kokoojauran suotuisimman sijainnin laskemiseen.
- Sen sijaan ajouraverkoston käytettävyyden arviointiin lähikuljetuksessa ei nykyisellään vielä ole saatavilla sovelluksia.
- Tämän työn avulla selvitettiin, miten ajouraverkostojen toteutustavat voidaan pelkistää toimintatavoiksi ajouraverkostojen suunnittelun ja käytön optimointia varten.



Taustaa: ajourasuunnittelu käytännössä

- Ajouraverkoston suunnittelun lähtökohtina ovat lähikuljetusmatkan minimointi, korjuuvaurioiden välttäminen sekä verkoston kokonaispituuden minimointi ensiharvennuksilla.
- Verkoston suuntaamisessa huomioidaan metsänhoidon suositukset (Äijälä ym. 2019), maaston kulkukelpoisuus sekä erilaiset ympäristö- ja työturvallisuustekijät.
 - Suunnittelussa on mahdollista hyödyntää leimikkokartan lisäksi myös saatavilla olevia paikkatietoaineistoja, kuten esimerkiksi Metsäkeskuksen korjuukelpoisuuskarttaa tai Luonnonvarakeskuksen kosteusindeksikarttaa.
- Ajouraverkoston suunnittelutyön tekee yleensä hakkuukoneenkuljettaja ennen työn aloittamista huomioiden edellä mainitut seikat.
- Ajouraverkoston toteutukseen kentällä on muodostunut koneellisen puunkorjuun myötä tunnistettavissa ja luokiteltavissa olevia käytännön toteutustapoja.
 - Nämä toteutustavat muodostavat perustan ajouraverkoston suunnitteluun.
- Ajouraverkoston muodostamisen tämänhetkiset käytännön toteutustavat saattavat poiketa periaatteeltaan siitä, mitä kokoojauran sijaintia visualisoivat sovellukset ehdottavat.
 - Mm. sovellusten kehittämiseen tarvitaan näin ollen lisätietoja ajouraverkoston toteutuksesta.



Taustaa: ajotapamenetelmiä

- Ajouraverkostojen toteutustapoja kutsutaan tässä työssä ajotapamenetelmiksi. Ajotapamenetelmien taustalla ei ole olemassa tieteellistä tutkimusta tai virallisia ohjeistuksia työtavoista.
- Ovaskainen ym. (2019) on jaotellut ja kuvannut seuraavat neljä ajotapamenetelmää:

1. Keruu-uramenetelmä

- Keruu-urat ovat läpiajettavia lenkkejä kokoojauralta. Kuvassa kokoojaura on merkitty paksulla katkoviivalla ja keruu-urat ohuella katkoviivalla.

2. Kiertomenetelmä

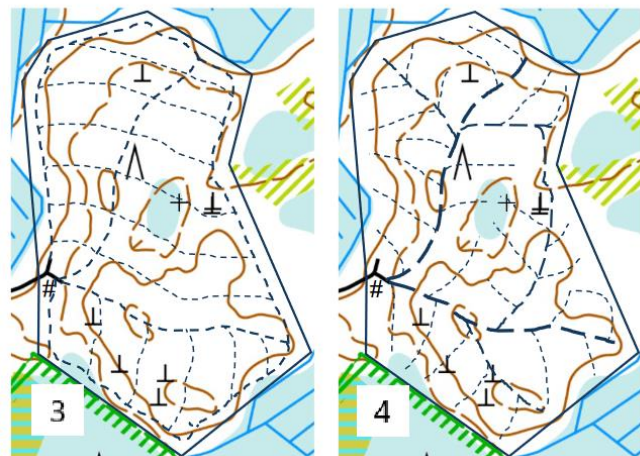
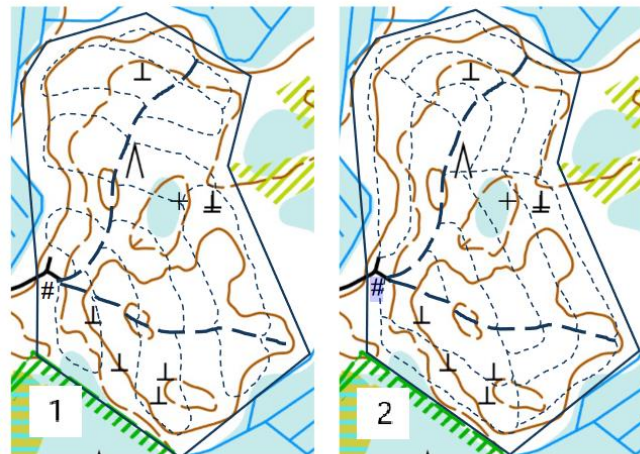
- Hakkuukohte kierretään ensin ympäri hakkuualueen rajoja pitkin.
- Seuraava ura hakataan sisemmäksi hakkuualueetta edellistä uraa mukaillen.

3. Läpiajomenetelmä

- Hakkuukohte kierretään ensin ympäri hakkuualueen rajoja pitkin.
- Ajourat hakataan kohteen lävitse reunalta toiselle.

4. Pistouramenetelmä

- Keruu-urat ovat pistoja kokoojauralta.



Ovaskaisen ym. (2019) kuvailemat ajouraverkoston muodostamistavat. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

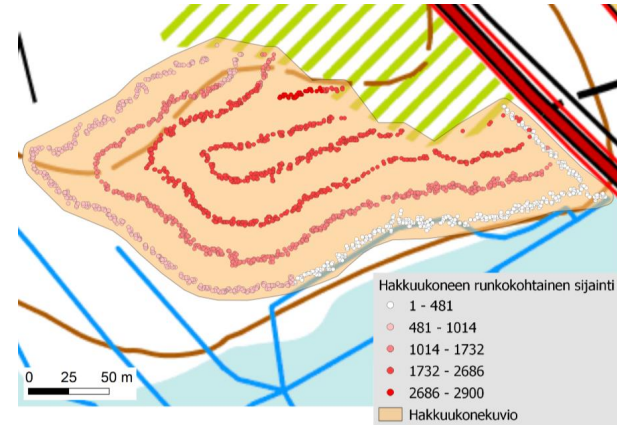
Tutkimuksen tavoitteet

- Tämän tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, voidaanko erilaisia ajouraverkostoja tunnistaa visuaalisesti ja luokitella Ovaskaisen ym. (2019) kuvailemiin ajotapamenetelmiin.
- Lisäksi tarkasteltiin onko ajouraverkostoista tunnistettavissa uusia, jo kuvatuista ajotavoista poikkeavia tapoja muodostaa ajouraverkostoja.
- Työssä tutkittiin ajotavan ja korjuun olosuhdetekijöiden välistä riippuvuutta: mitkä tekijät mahdollisesti vaikuttavat hakkuukohteen ajotapamenetelmän valintaan.
- Tavoitteena oli myös selvittää, kuinka paljon ajouraa muodostuu eri ajotavoilla ja onko ajouratiheydessä eli ajouraverkoston kokonaispituudessa eroja ajotapojen välillä.
- Tämä tutkimus perustuu Metsätehossa tehtyyn Janne Viljakaisen Itä-Suomen yliopiston pro gradu -tutkielmaan.

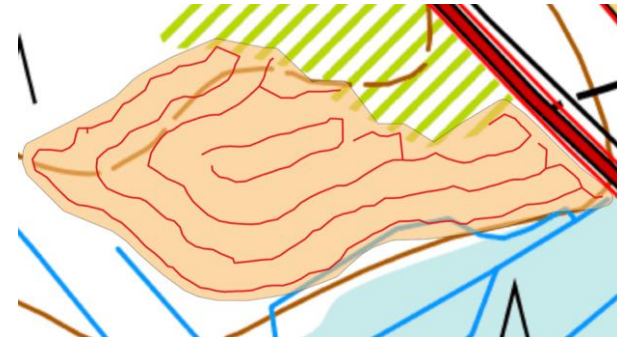


Hakkuukoneaineisto

- Tutkimuksessa käytettiin operatiivista hakkuukoneaineistoa, joka koostui hakkuukoneen runkokohtaisista sijainneista StanForD-standardin mukaisesti (Skogforsk 2022).
 - Hakkuukohteille oli tuotettu Metsätehon automaattisilla laskentamenetelmillä ajouraverkostot (Ovaskainen & Rieki 2022) ja hakkuukonekuviot (Melkas ym. 2020).
 - Aineisto sisälsi ensiharvennus- ja päätehakkuukohteita eri puolilta Suomea. Kohteet oli hakattu vuosina 2015–2021.
- Tutkimuksessa käytiin manuaalisesti läpi hakkuukohteita ajouraverkostoineen ja pyrittiin tunnistamaan niiden ajotapamenetelmiä.
- Ajotapamenetelmän tunnistamisessa tutkittiin hakkuukohteen ajouraverkoston muotoa ja sijoittumista kohteella.
- Osaa menetelmistä ei voitu tunnistaa luotettavasti pelkän ajouraverkoston muodon perusteella, vaan tämän lisäksi täytyi tarkastella myös hakkuun etenemisjärjestystä.
 - Puiden hakkuujärjestys voitiin selvittää ja visualisoida runkotiedoista runkonumeroiden ja runkokohtaisten sijaintien avulla.



Hakkuukoneen runkokohtaiset sijaintipisteet, joista hahmottuu ajouraverkosto. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

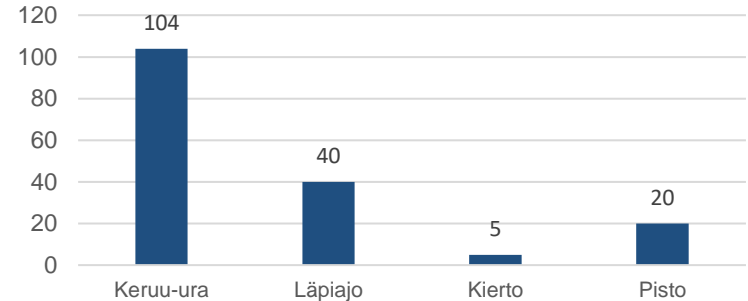


Automaattisella laskentamenetelmällä muodostettu ajouraverkosto.

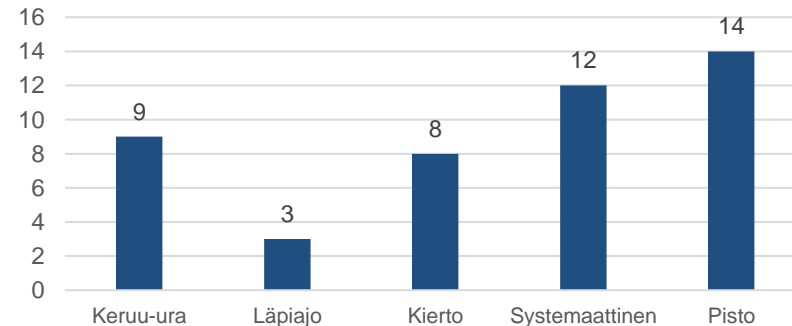
Ajotapamenetelmäaineisto

- Hakkuukohteiksi tutkimuksen aineistoon valittiin vain sellaisia kohteita, joilta pystyttiin selkeästi tunnistamaan ja luokittelemaan käytetty ajotapamenetelmä.
 - Tavoitteena oli koostaa tilastolliseen analyysiin riittävä määrä hakkuu- ja ajotavoittain luokiteltuja kohteita.
- Hakkuukohteista jätettiin pois:
 - Ajotapaluokitukseltaan epäselvät hakkuukohteet.
 - Pitkulaiset tai muuten epämääräisen muotoiset kohteet.
 - Lisäksi koko ajotapataarkastelun ulkopuolelle jätettiin alle yhden hehtaarin kohteet.
- Ensiharvennuksilta aineistoon luokiteltiin yhteensä 169 kuviota tai osakuviota neljään eri ajotapamenetelmään.
- Päätehakuun ajotapa-aineisto oli huomattavasti suppeampi. Päätehakuilta luokiteltiin yhteensä 46 kohdetta viiteen ajotapamenetelmään.
- Kalvoilla 9–14 on esimerkit kaikista luokittelun ajotapamenetelmistä ominaispiirteinen.

Ajotapamenetelmien määrät ensiharvennuksilla

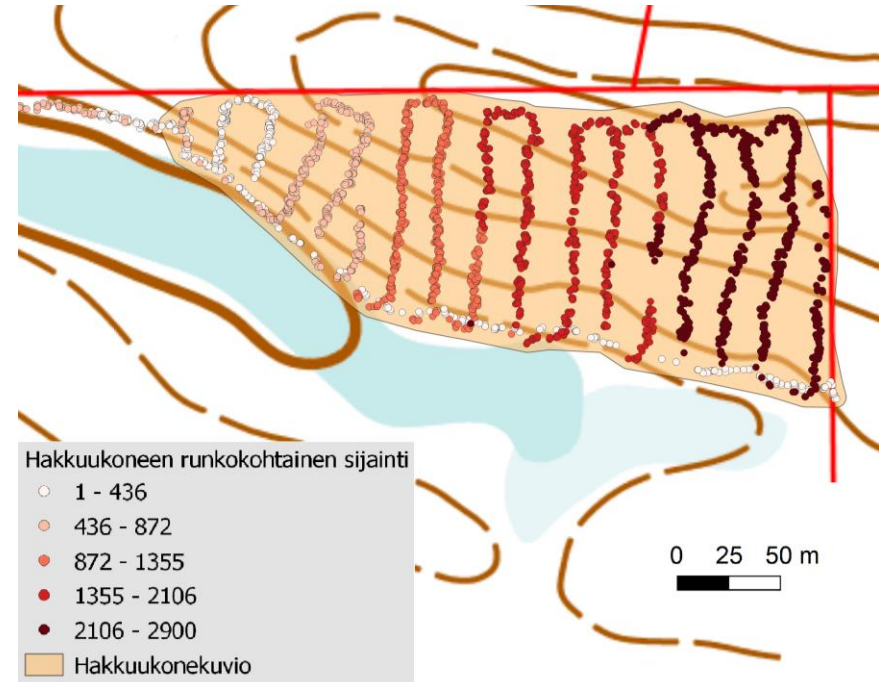


Ajotapamenetelmien määrät päätehakuilla



Keruu-uramenetelmä

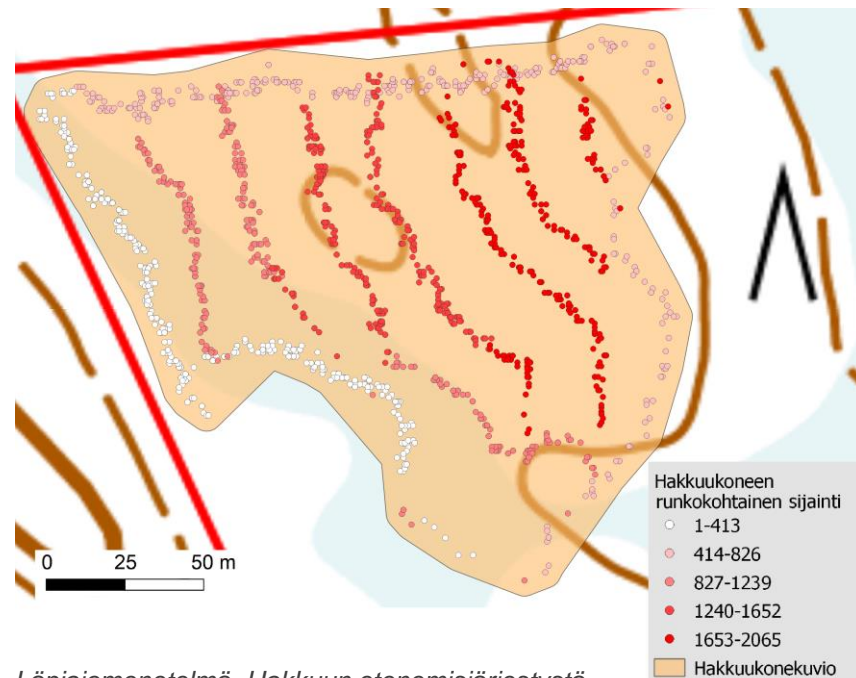
- Tarkastelu kohdistuu läpiajettaviin keruu-uran lenkkeihin.
- Hakkuun etenemisjärjestyksellä ei ole luokitteluun vaikutusta. Menetelmässä voidaan hakata ensin kokoojaura tai aloittaa hakkuu suoraan keruu-urista.
- Kokoojaura voi sijaita kohteen reunalla tai keskiosassa.
- Keruu-uramenetelmässä keruu-uralenkkiä päätetään voidaan myös yhdistää.



Keruu-uramenetelmä. Hakkuun etenemisjärjestyttä on havainnollistettu värein. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Läpiajomenetelmä

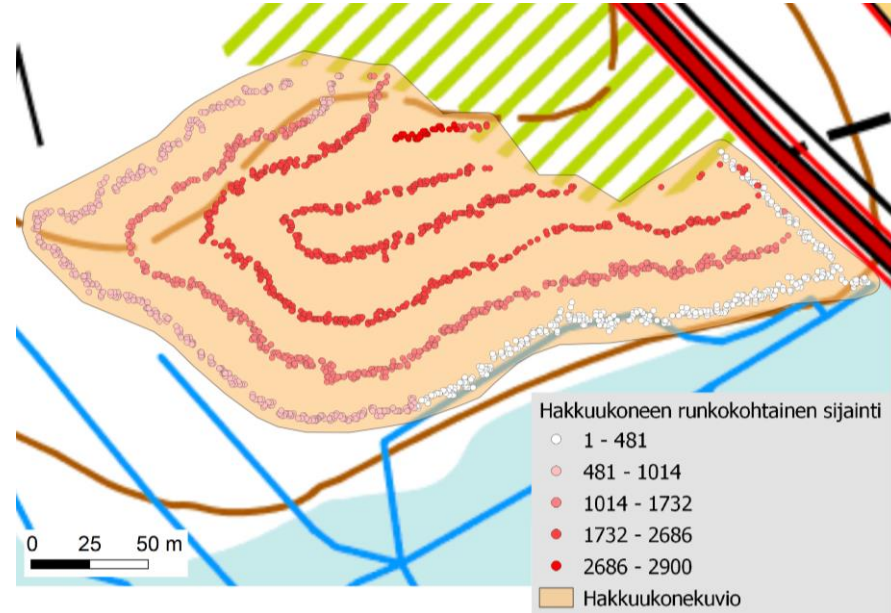
- Läpiajomenetelmässä hakataan ensin kuvion reunoja seuraten hakkuukohde ympäri. Sen jälkeen keruu-urat hakataan kohteen läpi reunalta toiselle.
- Lävistävien urien hakkuujärjestyksellä tai -suunnalla ei ole merkitystä luokitteluun.
- Läpiajomenetelmällä muodostuva uraverkosto on hyvin samankaltainen kuin keruu-uramenetelmän uraverkosto, jossa keruu-uralenkkien päitä on yhdistetty.



Läpiajomenetelmä. Hakkuun etenemisjärjestystä on havainnollistettu värein. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Kiertomenetelmä

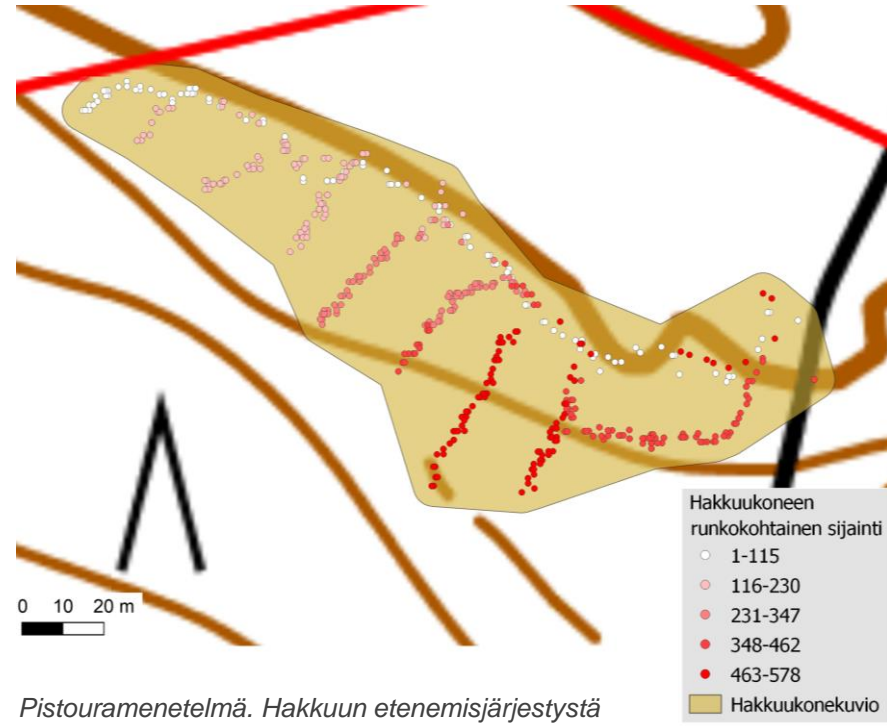
- Kiertomenetelmä voidaan tunnistaa ajouraverkoston muodon pohjalta, mutta hakkuun etenemisjärjestyksen tarkastelu helpottaa tunnistamista.
- Menetelmässä hakkuukohte kierretään ensin ympäri reunoja seuraten, minkä jälkeen sisempiä uria hakataan aina edellistä uraa mukaillen.



Kiertomenetelmä. Hakkuun etenemisjärjestyksestä on havainnollistettu värein. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Pistouramenetelmä

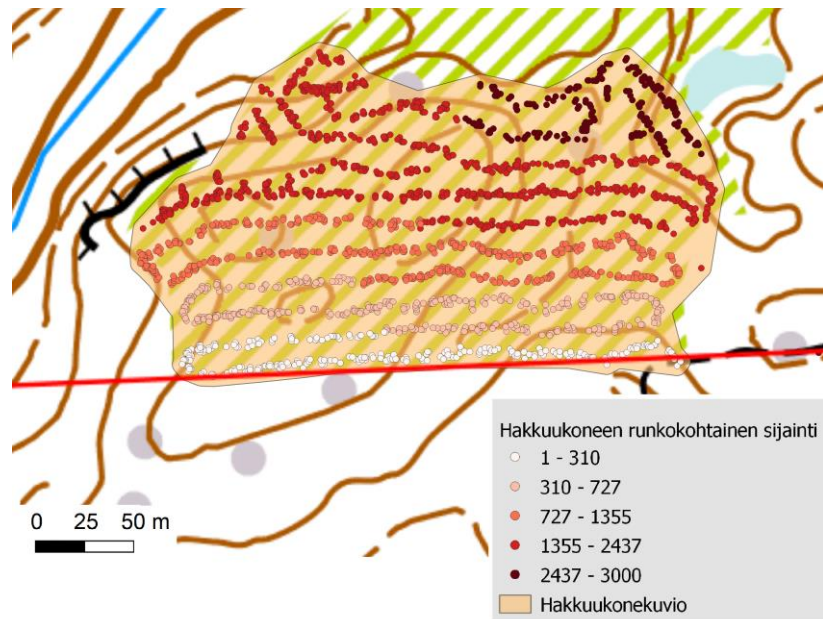
- Pistouramenetelmän tunnistuksessa tarkasteltiin keruu-urien päitä.
- Menetelmässä keruu-urista ei tehdä läpiajettavia.
- Pistouramenetelmän tunnistuksessa menetelmä varmistettiin hakkuujärjestyksen ja ilmakuvan avulla.
- Joillakin hakkuukohteilla voi päästä ajamaan kohteen laidassa ilman, että uraa tarvitsee avata, jolloin uraverkoston voi tunnistaa pistouramenetelmäksi.



Pistouramenetelmä. Hakkuun etenemisjärjestystä on havainnollistettu värein. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Systemaattinen menetelmä

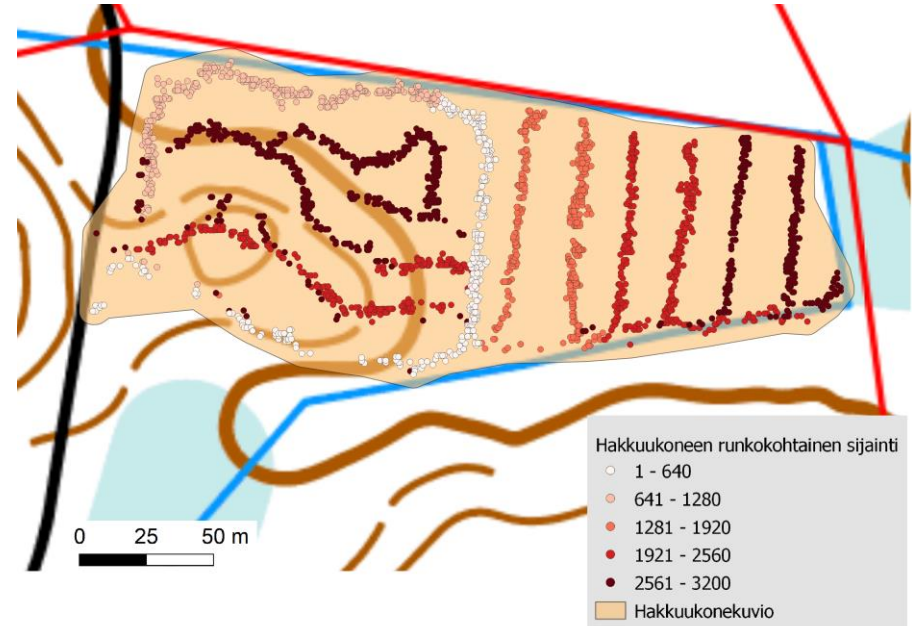
- Kalvojen 9–12 ajotapamenetelmiä havaittiin sekä ensiharvennus- että päätehakkuukohteilta.
- Päätehakkuiden ajouraverkostoista löydettiin Ovaskaisen ym. (2019) kuvailemiin menetelmiin nähden uusi tapa muodostaa ajouraverkosto.
 - Tämä nk. systemaattinen menetelmä luokiteltiin omaksi ajotavakseen.
- Systemaattisessa menetelmässä hakkuukohteella ajetaan järjestelmällisesti reunalta toiselle edestakaisin.
- Kokoojauran sijaintia ei määritetä hakkuun yhteydessä.



Systemaattinen menetelmä. Hakkuun etenemisjärjestystä on havainnollistettu värein. Peruskartta © Maanmittauslaitos.

Useampia ajotapamenetelmiä samalla kohteella

- Osalla hakkuukoneaineiston kohteista havaittiin useampia ajotapamenetelmiä.
- Tällaisessa tapauksessa kohde jaettiin osakuviioihin ajotapojen mukaisesti ja ne käsiteltiin omina hakkuukohteinaan.
 - Osakuvioiden pinta-alat mitattiin.



*Hakkuukohteella on käytetty läpiajo- ja pistouramenetelmää.
Peruskartta © Maanmittauslaitos.*

Tutkimusaineisto

- Tutkimuksessa selvitettiin korjuun olosuhdetekijöiden riippuvuutta kohteella käytettyyn ajotapamenetelmään.
- Hakkuukohteilta valittiin taustamuuttujiksi kohteen ajouraverkosta ja muita ominaisuuksia ilmentäviä tunnuksia, kuten kantavuus-, kasvupaikka- ja maaperätietoja.
- Automaattisella uraston laskentamenetelmällä tuotetuista ajouraverkostoista laskettiin ajouratiheys (m/ha) ja keskimääräinen ajouraväli (m) (Riekki ym. 2019, Ovaskainen & Riekki 2022).
- Hakkuukohteisiin liitettiin ulkoisten paikkatietoaineistojen tietoja.
 - Liitos tehtiin Metsätehon kehittämän metsätiedon palvelualustan avulla (Seppälä ym. 2021).
- Peruskartalta tarkasteltiin myös hakkuukohteiden rajautumista kohteen ulkopuolisiin tekijöihin sekä muita erityiskohteita, jotka voisivat vaikuttaa ajourasuunnitteluun.

Taustamuuttujat:

Aineistojen lähteet:

Ajouratunnukset:

- Ajouratiheys (m/ha)
- Uraväli (m)
- Uranvarsitiheys (m³/100 m)
- Alueen ala (ha)
- Kuvion keskiläpimitta (m)
- Maaston kaltevuus korkeusmallista (DEM) (%)

DTW: Luonnonvarakeskus

DEM: Maanmittauslaitos

** Suomen metsäkeskus*

Metsätehon metsätiedon palvelualustan aineistot:

- Depth-to-water -indeksi (DTW), keskiarvo (m)
- DEM, keskihajonta (m)
- Poistuma, kokonais- ja puulajikohtainen (m³/ha)*
- Maaperä (Karkea-, hieno- ja turvemaa) (%)*
- Kasvupaikka (%)*
- Kasvupaikan alaryhmä (Kangas, korpi, räme) (%)*
- Korjuukelpoisuus (KKL, 6 kantavuusluokkaa) (%)*
 - KKL1: kelirikko
 - KKL2: normaali kesä, kivennäismaa
 - KKL3: kuiva kesä, kivennäismaa
 - KKL4: normaali kesä, turvemaa
 - KKL5: kuiva kesä, turvemaa
 - KKL6: talvi

Erityiskohteet peruskartalta:

- Tie
- Tilanraja
- Sähkölinja
- Ojaverkosto
- Suojelualue



Tilastolliset menetelmät

Korrelaatioanalyysi

- Taustamuuttujien välisiä riippuvuuksia tutkittiin Pearsonin korrelaatiokertoimen avulla. Tavoitteena oli tarkastella, mitkä muuttujat ovat keskenään riippuvia tai riippumattomia ja siten sopivia muodostettaviin malleihin.

Mann-Whitneyn U-testi

- Taustamuuttujien keskiarvojen erojen tilastollisessa testauksessa käytettiin Mann-Whitneyn U-testiä.

Lineaarinen diskriminanttianalyysi (LDA) eli erotteluanalyysi

- Analyysin tavoitteena oli ajotapamenetelmien luokittelu ja mallinnus sekä ajotapamenetelmiä erottelevien muuttujien selvittäminen.
- Analyysin onnistumista arvioitiin oikeinluokitusprosentin ja Cohenin kappa -arvon avulla.

Logistinen regressioanalyysi

- Logistisessa regressiossa muodostetaan malli, jossa selittävien muuttujien avulla ennustetaan, mihin selitettävän muuttujan luokkaan havainto kuuluu (Nummenmaa 2009). Logistisella regressiolla selvitettiin tarkemmin myös muuttujien vaikutusta ajotavan valintaan.
- Tässä tutkimuksessa selitettäviä luokkamuuttujia (ajotapamenetelmät) oli ensiharvennuksilla neljä ja päätehakkuilla viisi, minkä vuoksi muodostettiin multinomiaalisia logistisia regressiomalleja (MLR). Kyseessä on logistisen regression laajennus, jota käytetään silloin, kun selitettäviä muuttujia on enemmän kuin kaksi.
- Multinomiaalisessa mallissa yksi luokka valitaan referenssiluokaksi ja muita luokkia verrataan valittuun referenssiluokkaan.



Tulokset: ajotapamenetelmien eroja ensiharvennuksilla

- Tilastollisessa testauksessa merkittävimmät erot ajotapamenetelmien välillä ensiharvennuksella olivat alueen pinta-alassa, kaltevuudessa, kuvion keskimääräisessä halkaisijassa ja kelirikko-korjuukelpoisuudessa (KKL1).
- Hakkuukohteilla, joilla oli käytetty pistouramenetelmää, muotoa kuvaavat tunnuksat eli alueen pinta-ala (ha) ja kuvion keskimääräinen halkaisija (m) olivat keskimäärin pienempiä kuin muiden ajotapojen hakkuualoilla.
- Pistouramenetelmän kohteiden suuri maaston kaltevuusprosentti erottui muiden menetelmien kohteiden kaltevuuksista selvemmin.
- Erotteluanalyysissä (LDA) ajotapamenetelmiä erotteleviksi muuttujiksi havaittiin vain kuvion keskimääräinen halkaisija sekä kaltevuus.
- Logistisen regressioanalyysin (MLR) avulla selvitettiin kuvion keskimääräisen halkaisijan ja kaltevuuden vaikutusta ajotavan esiintymistodennäköisyyteen tarkemmin. Kaltevuus osoittautui eniten ajotapamenetelmiä erottelevaksi muuttujaksi.
- Mallien (LDA ja MLR) luokittelutarkkuus oli heikko ja pistouramenetelmä oli ainoa ajotapamenetelmä, joka erottui muista menetelmistä.

Muuttujien keskiarvot ensiharvennuksilla ja erojen tilastollinen merkitsevyys. Tilastollisen merkitsevyuden taso on ilmaistu tähdillä. Yhdellä tähdellä on merkitty 0,05 tasolla, kahdella tähdellä 0,01 tasolla ja kolmella tähdellä 0,001 tasolla tilastollisesti merkitsevä ero.

	Keruu- ura A	Läpiajo B	Kierto C	Pisto D	Tilastollinen merkitsevyys
Lukumäärä	104	40	5	20	
Ajouratiheys (m/ha)	568,3	597,6	589,6	587,2	A-B*
Uraväli (m)	21,0	20,6	20,0	20,2	A-D*
Uranvarsitiheys (m ³ /100m)	9,7	10,3	12,1	10,7	
Alueen pinta-ala (ha)	2,8	2,4	2,1	1,5	A-D***, B-D**
Maaston kaltevuus (%)	5,1	5,0	4,3	12,4	A-D***, B-D**
Kuvion keskihalkaisija (m)	118,2	107,3	96,8	91,6	A-B*, A-D***
Poistuma (m ³ /ha)	55,2	61,2	70,6	62,6	
Poistuma mänty (m ³ /ha)	30,3	22,4	24,9	18,4	A-D*
Poistuma kuusi (m ³ /ha)	9,5	16,3	21,5	16,6	A-B*
Poistuma koivu (m ³ /ha)	16,6	21,0	18,7	27,4	A-D*
Karkeamaa (%)	67,1	57,8	24,1	72,5	A-C*, B-C*, C-D*
Hienomaa (%)	19,8	30,0	48,6	27,1	A-B*
Turvemaa (%)	13,1	12,2	27,3	0,4	B-D*, C-D*
Kangas (%)	88,1	87,8	72,7	99,6	B-D*
Korpi (%)	3,7	7,7	1,4	0,4	
Räme (%)	8,1	4,5	25,9	0,0	A-D*, B-D*, C-D***
KKL1 (%)	8,5	0,3	0,0	26,9	A-D**, B-D***, C-D*
KKL2 (%)	57,4	23,4	57,9	38,0	A-D*
KKL3 (%)	17,9	55,9	10,3	20,3	
KKL4 (%)	2,4	19,7	4,9	0,1	C-D*
KKL5 (%)	2,9	0,6	17,3	0,0	C-D**
KKL6 (%)	10,9	0,0	9,5	14,7	



Tulokset: ajotapamenetelmien eroja päätehakkuilla

- Päätehakkuiden osalta hakkuukohdeaineisto oli pieni, eikä yhtä selkeitä ja merkitseviä eroja löytynyt kuin ensiharvennuksilla.
- Pistouramenetelmällä hakatuilla päätehakkuukohteilla oli selvästi suurin kaltevuus.
- Turvemaan osuus keruu-ura- ja systemaattisen menetelmän kohteilla oli suurempi kuin muissa menetelmissä. Kyseisten menetelmien kohteilla havaittiin myös eniten ojaverkostoja.
- Erotteluanalyysin (LDA) ja logistisen regressioanalyysin (MLR) tulokset olivat samansuuntaiset kuin ensiharvennuksilla.
 - LDA:ssa kuvion keskimääräinen halkaisija ja kaltevuus olivat ainoat merkitsevät muuttujat.
 - MLR:ssa kaltevuus osoittautui ajotavan valintaan vaikuttavimmaksi tekijäksi.
- Myös päätehakkuilla mallien ennustustarkkuus oli heikko ja pistouramenetelmä oli parhaiten erottuva ajotapamenetelmä.

Muuttujien keskiarvot ensiharvennuksilla ja erojen tilastollinen merkitsevyys. Tilastollisen merkitsevyyden taso on ilmaistu tähdillä. Yhdellä tähdellä on merkitty 0,05 tasolla, kahdella tähdellä 0,01 tasolla ja kolmella tähdellä 0,001 tasolla tilastollisesti merkitsevä ero.

	Keruu- ura A	Läpiajo B	Kierto C	Syste- maatti- nen D	Pisto E	Tilastollinen merkitsevyys
Lukumäärä	9	3	8	12	14	
Ajouratiheys (m/ha)	690,2	732,1	676,6	671,5	715,1	
Uraväli (m)	17	17	18,2	17,1	16,8	
Uranvarsitiheys (m ³ /100m)	28,1	36,9	33,2	39,2	33,1	A-D**
Alueen pinta-ala (ha)	2	1,2	4	2,1	1,9	C-D*
Kaltevuus (%)	4,1	7,9	5,7	4,7	14,0	A-E*, C-E*, D-E**
Kuvion keskihalkaisija (m)	93,7	78,4	91,7	103,2	91,6	
Poistuma (m ³ /ha)	193,7	270,3	220,5	263,0	237,0	A-D*
Poistuma mänty (m ³ /ha)	36,2	34,8	70,9	54,3	45,1	
Poistuma kuusi (m ³ /ha)	105,1	185,7	130,2	172	163,7	
Poistuma koivu (m ³ /ha)	45,3	46,9	34,5	35,6	21,9	
Karkeamaa (%)	31,6	36,8	55,4	44,0	75,1	
Hienomaa (%)	30,6	62,3	32,1	14,6	22,0	
Turvemaa (%)	37,8	0,9	12,5	41,4	2,9	C-D*, D-E*
Kangas (%)	62,2	99,1	87,5	67,6	97,1	
Korpi (%)	24,5	0,9	12,2	26,0	0,3	
Räme (%)	13,3	0,0	0,3	6,5	2,6	
KKL1 (%)	18,3	24,1	41,8	13,2	20,7	
KKL2 (%)	6,5	34,0	32,3	37,4	27,4	A-B*, A-C**, A-E**
KKL3 (%)	8,8	41,9	14,5	12,8	24,9	A-B*, A-E*
KKL4 (%)	10,6	0,0	0,0	0,9	0,9	
KKL5 (%)	7,6	0,0	0,0	0,5	3,6	
KKL6 (%)	48,3	0,0	11,4	35,3	22,6	



Tulokset: ajouratiheys

- Ensiharvennuksilla havaittiin tilastollisesti merkitsevä ero keruu-uramenetelmän (568 m/ha) ja läpiajomenetelmän (598 m/ha) ajouratiheyksien välillä.
- Päätehakuilla ajouratiheyksissä ei ollut tilastollisesti merkitseviä eroja.

Ajouratiheydet ensiharvennuksilla.

Tilastollisen merkitsevyyden taso on ilmaistu tähdillä. Yhdellä tähdellä on merkitty 0,05 tasolla, kahdella tähdellä 0,01 tasolla ja kolmella tähdellä 0,001 tasolla tilastollisesti merkitsevä ero.

	Keruu-ura A	Läpiajo B	Kierto C	Pisto D	Tilastollinen merkitsevyys
Lukumäärä	104	40	5	20	
Ajouratiheys (m/ha)	568,3	597,6	589,6	587,2	A-B*

Ajouratiheydet päätehakuilla.

	Keruu-ura A	Läpiajo B	Kierto C	Systemaattinen D	Pisto E	Tilastollinen merkitsevyys
Lukumäärä	9	3	8	12	14	
Ajouratiheys (m/ha)	690,2	732,1	676,6	671,5	715,1	



Tulosten tarkastelu: ajotapamenetelmien luokittelu

- Tutkimuksessa tunnistettiin ja luokiteltiin operatiivisilta päätehakkuukohteilta aiemmin kuvailtujen ajotapamenetelmien lisäksi systemaattinen menetelmä.
- Ensiharvennuksilla ajotapa-aineiston hakkuukohteiden kokonaislukumäärä oli tutkimuksen kannalta riittävä, mutta havaintojen lukumäärä olisi voinut olla tasaisempi ajotapamenetelmien välillä.
- Päätehakkuilla ajotapa-aineisto oli liian pieni tilastollisesti luotettavien tulosten ja johtopäätöksien tekemiseen.
- Ajotapamenetelmien lukumäärät aineistossa antavat viitteitä menetelmien yleisyydestä operatiivisessa hakkuutyössä.



Tulosten tarkastelu: ajotapamenetelmän valinta

Ensiharvennuksilla

- Analyysseissa pistouramenetelmä erottui muista ajotapamenetelmistä.
- Pistouramenetelmällä keskimääräinen maaston kaltevuus oli suurin (12,4 %). Muiden menetelmien kohteilla kaltevuus oli noin 4–5 %.
 - Aikaisemmissa tutkimuksissa maaston kaltevuuden on havaittu olevan yksi merkittävimmistä ajourasuunnitteluun vaikuttavista tekijöistä (Räsänen 2019, Turunen 2018, Väätäinen ym. 2013).
 - Kuvion keskimääräinen halkaisija vaikutti myös, mutta huomattavasti vähemmän. Kuvion muoto vaikuttaa ajourien sijoittamisen mahdollisuuksiin.
- Pistouramenetelmässä kelirikko-korjuukelpoisuusluokan osuus oli suurin ja se erosi tilastollisesti merkitsevästi muista menetelmistä.
 - Väätäisen ym. (2013) tutkimuksessa kaltevien maastojen on havaittu olevan kantavuudeltaan parempia tasaisiin maastoihin verrattuna.
- Keruu-ura-, läpiajo- ja kiertomenetelmän väliltä ei löytynyt merkittäviä eroja taustamuuttujista.

Päätetöillä

- Tulokset olivat samansuuntaisia kuin ensiharvennuksilla. Pistouramenetelmä erottui selvimmin. Siinä keskimääräinen maaston kaltevuus oli 14,0 % ja muissa menetelmissä kaltevuus vaihteli noin 4–8 % välillä.
- Päätetöillä havaittiin viitteitä siitä, että turvemaa/ojaverkosto vaikuttaa valittuun ajotapaan. Keruu-uramenetelmällä ja systemaattisella menetelmällä vältetään turhia ojien ylityksiä.
- Ajotapamenetelmiä selittävien muuttujien vähyyys ja mallien heikko selitysaste viittaavat siihen, että ajotavan valintaan vaikuttaa myös sellaisia tekijöitä, joita tässä tutkimuksessa ei tarkasteltu.



Tulosten tarkastelu: ajouratiheys

- Ensiharvennuksilla läpiajomenetelmän (598 m/ha) ja keruu-uramenetelmän (568 m/ha) väliltä löytyi tilastollisesti merkitsevä ero keskimääräisessä ajouratiheydessä. Hakalan (2021) maisterintutkielmassa ensiharvennusten keskimääräinen ajouratiheys oli 583 m/ha.
 - Läpiajomenetelmällä muodostuu enemmän uraa silmämääräisestikin arvioituna kuin keruu-uramenetelmällä.
 - Pistouramenetelmällä olisi voinut olettaa muodostuvan vähiten uraa. Automaattinen laskentamenetelmä kuitenkin yhdistää usein pistourien päät, jolloin uraverkosto vaikuttaa keruu-uramenetelmältä ja pistourien pituus muodostuu todellista suuremmaksi.
- Päätehakuilla ei havaittu merkitseviä eroja ajouratiheyksissä. Jäävää puustoa ei päätehakuilla tarvitse varoa, joten olennaisempaa olisi tutkia kuormatraktorin käyttämiä reittejä.



Johtopäätökset

- Ajotapamenetelmistä taustamuuttujien perusteella tunnistettavaksi erottui selkeästi vain pistouramenetelmä, johon liittyy erityisesti maaston kaltevuus.
 - Maaston kaltevuuden merkitys ajourasuunnitteluun on tunnistettu aiemmissakin ajourasuunnitteluun liittyvissä tutkimuksissa.
- Muita ajotapamenetelmien valintaan vaikuttavia tekijöitä ei tunnistettu tilastollisesti merkitseviksi tässä tutkimuksessa. Tähän voi olla selityksenä, että ajotapamenetelmän valintaan vaikuttaa paljon myös kuljettajan tottumukset sekä lähikuljetukseen liittyvät olosuhdetekijät, joita ei tässä tutkimuksessa tarkasteltu.
 - Tällöin hakkuukohteen piirteet ja ominaisuudet vaikuttavat vähemmän ajotapamenetelmän valintaan.
- Ensiharvennuksilla havaittiin ajouratiheydessä tilastollisesti merkitsevä ero keruu-ura- ja läpiajomenetelmän väliltä.



Jatkotutkimustarpeita

- Ajotapamenetelmien vaikutusta lähikuljetukseen ja sen kokonaismatkaan tulisi tutkia lisää vakioiduilla kohteilla.
 - Esimerkiksi ajouratiheyden vaihtelun vaikutusta kuormatraktorin työhön tulisi selvittää.
 - Myös verkoston yksityiskohtien, kuten yhdysurien sijoittamisen tutkiminen hyödyttäisi ajouraverkoston käytettävyyden arviointia lähikuljetuksessa.
- Uusien korjuumenetelmien ja kuljettajaa avustavien sovelluksien kehittämiseksi ajotapamenetelmän valintaan liittyvää hiljaista tietoa tulisi selvittää tarkemmin konetekniikan ja kuljettajan mieltymysten näkökulmasta.



Ajourasuunnittelun ja lähikuljetuksen toteutuksen tavoitetilä

- Tulevaisuuden tavoitetilassa voidaan erottaa kaksi korjuun suunnittelun vaihetta:
 - ennen hakkuuta suunnitellaan ajourien paras mahdollinen sijoittaminen hakkuukohteelle ja
 - lähikuljetus optimoidaan hakkuulla tehtyjen puutavarakasojen sijaintien ja toteutuneen ajouraverkoston avulla.
- Hakkuukoneenkuljettaja saa jo ennen hakkuuta suunnitelman siitä, millainen ajouraverkosto kohteelle hakataan.
- Toteutunutta ajouraverkostoa määritetään hakkuukoneen tallentamista sijaintitiedoista hakkuun etenemisen mukaan.
- Kuormatraktorin kuljettajalle tuotetaan hakkuun edetessä päivittyvä suunnitelma kerättävistä kuormista.
 - Suunnitelma sisältää sekä kerättävien kasojen sijainnit että ajoreitityksen toteutuneella ajouraverkostolla.
 - Suunnitelma voidaan tuottaa jo hakatulle osalle kohdetta, kun hakkuu on vielä meneillään muualla kohteen alueella.



Lähteet

- Hakala M (2021) Hakkuukonetiedon hyödyntäminen kuviorajauksessa ja ajouratunnusten laskennassa. Maisterintutkielma. Helsingin yliopisto, maatalous–metsätieteellinen tiedekunta 2021. 81 s. <https://helda.helsinki.fi/handle/10138/328779>
- Melkas T, Rieikki K, Sorsa J-A (2020) Automated Method for Delineating Harvested Stands Based on Harvester Location Data. Remote Sens. 2020, 12(17), 2754. <https://doi.org/10.3390/rs12172754>
- Nummenmaa L (2009) Käyttämistieteiden tilastolliset menetelmät. Kustannusosakeyhtiö Tammi.
- Ovaskainen H, Hämäläinen J, Poikela A, Räsänen T, Määttä M, Sarjakoski S, Lahti M, Salo M (2019) Ajourakone – hakkuukoneen kuljettajan apuväline korjuun suunnitteluun. Metsätehon tuloskalvosarja 11/2019. <https://www.metsateho.fi/ajourakone-hakkuukoneen-kuljettajan-apuväline-korjuun-suunnitteluun/>
- Ovaskainen H & Rieikki K (2022) Computation of Strip Road Networks Based on Harvester Location Data. Forests 2022, 13(5), 782. <https://doi.org/10.3390/f13050782>.
- Rieikki K, Melkas T, Ovaskainen H, Poikela A, Sorsa J-A (2019) Ajourien automaattinen tuottaminen ja ajouratunnusten määrittäminen hakkuukoneen sijaintitietoon perustuen. Metsätehon tuloskalvosarja 4/2019. <https://www.metsateho.fi/ajourien-automattinen-tuottaminen/>
- Räsänen M (2019) Puunkorjuun tehostaminen ajourakone-sovelluksella. Helsingin yliopisto. 47 s.
- Seppälä P, Malinen J, Rieikki K, Ovaskainen H, Strandström M, Räsänen T, Poikela A, Sorsa J-A (2021) Metsätiedon palvelualusta puunkorjuun laadunhallinnassa ja talousmetsän luonnonhoidon todentamisessa. Metsätehon raportti 262. <https://www.metsateho.fi/wp-content/uploads/Raportti-262-Metsätiedon-palvelualusta-puunkorjuun-laadunhallinnassa.pdf>
- Skogforsk (2022) StanForD/StanForD 2010 Standard for Forest Machine Data and Communication. <http://www.skogforsk.se/english/projects/stanford/>. Viitattu 11.8.2022
- Turunen J (2018) Hiljainen tieto lähikuljetuksen ajourasuunnittelussa. Haastattelututkimus. Opinnäytetyö. Lapin Ammattikorkeakoulu. 74 s.
- Viljakainen J (2022) Metsäkoneiden ajouraverkostojen toteutustapojen luokittelu. Pro gradu -tutkielma. Itä-Suomen yliopisto, luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, metsätieteiden osasto 2022. 68 s. <https://erepo.uef.fi/handle/123456789/27746?locale-attribute=fi>
- Vätäinen K, Lamminen S, Ala-Ilomäki J, Sirén M, Asikainen A (2013) Kuljettajaa opastavat järjestelmät koneellisessa puunkorjuussa – kooste hankkeen avaintuloksista. Metlan työraportteja. Numero 279. 24 s.
- Willén E, Davidsson A, Frisk M, Flisberg P, Rönnqvist M (2019) Decision support for proposing main extraction routes in final felling. Demonstration report: Södra. Arbetsrapport 1020-2019 (English version). Skogforsk.
- Äijälä O, Koistinen A, Sved J, Vanhatalo K, Väisänen P (2019) Metsänhoidon Suositukset. Tapion Julkaisuja; Tapio Oy: Helsinki, Finland, 2019. https://tapio.fi/wp-content/uploads/2020/09/Metsanhoidon-suositukset_Tapio_2019.pdf. Viitattu 11.8. 2022

