



Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2023

Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa

Juha Laitila ja Jaakko Repola

Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2023

Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa

Juha Laitila ja Jaakko Repola



Viittausohje:

Laitila, J. & Repola, J. 2023. Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 57 s.

Juha Laitila ORCID ID, <https://orcid.org/0000-0003-4431-3319>



ISBN 978-952-380-685-6 (Painettu)

ISBN 978-952-380-686-3 (Verkkójulkaisu)

ISSN 2342-7647 (Painettu)

ISSN 2342-7639 (Verkkójulkaisu)

URN <http://urn.fi/URN:ISBN:978-952-380-686-3>

Copyright: Luonnonvarakeskus (Luke)

Kirjoittajat: Juha Laitila ja Jaakko Repola

Julkaisija ja kustantaja: Luonnonvarakeskus (Luke), Helsinki 2023

Julkaisu vuosi: 2023

Kannen kuva: Juha Laitila

Painopaikka ja julkaisumyynti: PunaMusta Oy, <http://luke.omapumu.com/fi>

Tiivistelmä

Juha Laitila¹ ja Jaakko Repola²

¹ Luonnonvarakeskus, Yliopistokatu 6 B 80100 Joensuu

² Luonnonvarakeskus, Ounasjoentie 6 96200 Rovaniemi

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten jatkuvapeitteisessä metsäkasvatuksessa käytetty poimintahakkuu eroaa hakkuun tuottavuuden, puunkorjuun kustannusten ja korjuujäljen osalta tasaikäisrakenteisessa metsätaloudessa käytettävistä alaharvennuksesta ja avohakkuusta. Tutkimukseen valittiin Lapista mäntyvaltaisia kuivahkon kankaan metsiköitä, joissa oli luonnostaan puuston eri-ikäisrakenteisuutta, ja joihin voitiin rintarinnan soveltaa sekä jatkuvan kasvatuksen poimintahakkuuta että jaksollisen metsänkasvatuksen hakkuutapoja. Tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi korjuukonekalusto, samoin kuin koneenkuljettaja olivat samat koko tutkimuksen ajan.

Hakkuukoneeseen oli asennettu videokamera, jonka avulla hakkuutyö videoitiin alusta loppuun. Videoaineiston analysoinnissa määritettiin runkokohtainen aika työvaiheittain ja se yhdistettiin hakkuukoneen mittalaitteen tuottamaan runkokohtaiseen tilavuustietoon. Kootun aineiston pohjalta laadittiin tuottavuusmallit harvennushakkuulle, poimintahakkuulle ja avohakkuulle. Korjuukustannusten vertailulaskelmat (hakkuu + metsäkuljetus) perustuivat tuotetuihin hakkuun tuottavuusmalleihin sekä olemassa oleviin metsäkuljetuksen tuottavuusmalleihin ja metsäkoneiden kustannuslaskentapohjiin.

Vertailulaskelmien korjuuolosuhteet johdettiin aikatutkimuskoealatiетоjen pohjalta ja korjuukohteiden metsäkuljetusmatkaksi oletettiin 300 metriä. Aikatutkimuskoealojen mukaisissa korjuuolosuhteissa hakkuupoistuman hehtaaritiheys vaihteli harvennushakkuilla 85–1532 rungon, poimintahakkuilla 126–1718 rungon ja avohakkuilla 430–1601 rungon välillä. Hakkuukertymän keskiarvo aikatutkimuskoealoilla oli harvennushakkuulla 61,3 m³/ha, poimintahakkuulla 88,1 m³/ha ja avohakkuulla 140,4 m³/ha. Hakkuukertymän vaihteli harvennushakkuilla 8–164 m³/ha välillä, poimintahakkuilla 15–215 m³/ha välillä ja avohakkuilla 50–273 m³/ha välillä.

Avohakkuun mallinnettu käyttötuntituottavuus oli rungon käyttöosan tilavuudesta riippuen 1,0–7,0 m³/E₁₅h suurempi ja vastaavasti hakkuukustannus 0,3–3,8 €/m³ alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla kun hakkupoistuman tiheys oli 500 runkoa hehtaarilla ja hakattujen runkojen järeys oli 0,03–0,8 m³. Harvennus- ja poimintahakkuun välinen ero hakkuun tuottavuudessa ja kustannuksessa oli hyvin pieni. Hakkuukustannusvertailussa poiminta- ja harvennushakkuiden kustannuskäyrät leikkasivat laskentaperusteista riippuen, kun rungon käyttöosan tilavuus oli 0,06–0,2 m³. Em. suuremmilla rungon käyttöosaan tilavuuksilla alaharvennuksen hakkuukustannukset olivat poimintahakkuuta 0,01–0,10 €/m³ alemmat.

Poimintahakkuissa poistettavien puiden valinta tehtiin yläharvennusperiaatteella, eli poistettavat puut olivat pääsääntöisesti järeämpiä ja harvennusvoimakkuus metsän uudistumisen edistämiseksi suurempi kuin alaharvennusperiaatetta noudattavilla harvennushakkuilla, mikä ilmeni alempina puunkorjuukustannuksina hakkuutapojen välisessä kustannusvertailussa aikatutkimuskoealojen mukaisissa korjuuolosuhteissa. Vastaavasti suuremmasta hakkuutyön ja metsäkuljetuksen tuottavuudesta johtuen avohakkuilla puunkorjuukustannus (€/m³) oli

alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla, vaikka hakkuukertymä tai rungon käyttöosan keskitilavuus olivatkin samat.

Raportti on kirjoitettu osana KOPO – Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa hanketta, jonka hankekoodi oli A76935. Rahoittajana toimi Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus ja hanke toteutettiin 01.05.2021 - 30.06.2023 välisenä aikana.

Asiasanat: Puunkorjuu, tuottavuus, hakkuu, kustannukset, jatkuvapeitteinen metsänkasvatus, tasaikäisrakenteinen metsänkasvatus, polttoaineen kulutus, korjuujälki

Sisällys

1. Johdanto	7
1.1. Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus.....	8
2. Aineistot ja menetelmät.....	10
2.1. Tutkimuksessa käytetty korjuukalusto.....	10
2.2. Hakkuukokeet ja aikatutkimus	11
2.2.1. Hakkuukokeiden toteutus	11
2.2.2. Aikatutkimuksen toteutus.....	13
2.2.3. Aikatutkimusaineiston analysointi ja hakkuutyön mallinnus	14
2.3. Korjuujäljen ja puustotietojen inventointi.....	14
2.3.1. Puuston inventointi	14
2.3.2. Ajouravälin ja -leveyden mittaus	15
2.4. Korjuukustannusten laskenta.....	15
2.4.1. Polttoaineen kulutuksen mittaus	15
2.4.2. Metsäkoneiden tuntikustannuslaskenta	16
2.4.3. Korjuukustannusten laskenta hakkuutavoittain	20
3. Tulokset.....	21
3.1. Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit	21
3.2. Hakkuukertymä puutavaralajeittain.....	21
3.3. Korjuujälki ja puuston rakenne.....	25
3.3.1. Puuston rakenne	25
3.3.2. Korjuujälki	30
3.3.3. Ajouraväli ja -leveys	31
3.4. Hakkuutyön ajanmenekki ja tuottavuus	32
3.4.1. Työpistesiiirron ajanmenekkimallit.....	32
3.4.2. Hakkuun ajanmenekkimallit	33
3.4.3. Aputyövaiheiden ajanmenekki	40
3.4.4. Hakkuutapojen runkokohtainen ajanmenekki ja tuottavuus.....	40
3.5. Puunkorjuun kustannukset	42
3.5.1. Polttoaineen kulutus.....	42
3.5.2. Hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannukset	44
4. Tulosten tarkastelu	47
4.1. Työntutkimus.....	47
4.2. Polttoaineen kulutus.....	48

4.3. Korjuuolosuhteet	49
4.4. Vertailu aiempiin tutkimuksiin	51
4.5. Korjuukustannukset	52
4.6. Jäävän puuston rakenne ja kehitys poimintahakkuussa.....	52
5. Johtopäätökset.....	55
Viitteet.....	56

1. Johdanto

Metsälakimuutos vuonna 2014 toi metsänomistajille lisää vapautta metsien käsittelyyn ja mahdollisti jatkuvaan kasvatukseen eli eri-ikäismetsätalouteen perustuvan toimintamallin (Routa ja Huuskonen 2022). Jatkovapeitteinen metsänkasvatus tarkoittaa metsähoitoa ilman avohakkuuta (Valkonen 2022). Metsä jää hakkuun jälkeen aina puustoiseksi, ja uusia puita nousee alikasvoksista ja lisää syntyy luontaisesti. Eri-ikäismetsässä kasvaa kaikenkokoisia ja -ikäisiä puita, joista poimintahakkuin poistetaan parhaan arvokasvunsa päättäneitä suuria puita ja vialliset puut koosta riippumatta sekä tiheiköt harvennetaan (Valkonen ym. 2022). Jäljelle jäävien puiden oletetaan elpyvän hakkuun jälkeen ja pitävän yllä luontaisen uudistumisen ohella metsikön rakennetta ja hakkuumahdollisuuksia tulevina vuosikymmeninä. Koska selkeästi erottuvaa uudistumisvaihetta ei ole, taimettumiseen ja puiden tuulenkestävyyden parantamiseen tulee kiinnittää erityistä huomiota kaikissa toimenpiteissä (Valkonen 2022, Hynynen ym. 2022).

Jatkovapeitteisessä metsässä varjostava kookas puusto tulee kasvattaa harvana uudistumisen ja alikasvospuiden kehityksen turvaamiseksi. Tiheässä ja runsaspuustoisessa metsässä kilpailu kasvutilasta, valosta ja ravinteista on niin kovaa, ettei uusilla taimilla välttämättä ole mahdollisuutta kehittyä isoiksi puiksi (Hynynen ym. 2022). Suuressa osassa talousmetsien poimintahakkuukohteista tarvitaan siirtymähakkuuta, joissa metsän puuston tasaikäisrakennetta muutetaan kohti eri-ikäisrakennetta. Pienempi osa kohteista on jo aidosti eri-ikäisrakenteisia (Valkonen 2022). Jatkuvan kasvatuksen katsotaan soveltuvan erityisesti viljaviin kuusikoihin ja turvemaille. Turvemaille peitteinen metsänkasvatus mahdollistaa suotuisissa olosuhteissa riittävän vedenpinnan säätelyn vettä haihduttavan puuston avulla ja vähentää kunnostusojitustarvetta (Valkonen ym. 2022).

Tasaikäiseen metsänkasvatukseen verrattuna jatkovapeitteisen metsänkasvatuksen etuina on pidetty mm. vakaata hakkuukiertoa ja alhaisia metsänhoitokustannuksia: metsänviljelyä, taimikonhoitoa ja turvemaille kunnostusojitusta ei välttämättä tarvita (Valkonen ym. 2022). Lisäksi myös vältytään avohakkuun aiheuttamalta rajulta muutokselta (Valkonen 2022), mikä korostuu etenkin Lapissa, missä muut metsän käyttömuodot (esim. porotalous ja matkailu) asettavat omat rajoitteensa metsänkäsittelylle (Miina ym. 2020, Aro ym. 2022).

Jatkuvan kasvatuksen tutkimus on keskittynyt Etelä-Suomen kuusikoihin, ja tutkimustietoa menetelmän soveltuvuudesta männiköihin, etenkin Lapissa ja Pohjois-Suomessa ei ole julkaistu. Lisäksi aiempi tutkimus on keskittynyt kasvu- ja tuotosvaikutusten selvittämiseen, eikä eri hakkuutapojen vaikutusta puunkorjuun kustannuksiin ja korjuujäljen laatuun ole juuri tutkittu (Surakka & Sirén 2007). Puunkorjuun vaikutukset (hakkuutyön tuottavuus, puunkorjuun kustannukset ja korjuujälki) tulisi tuntea, jotta voitaisiin kokonaisvaltaisesti arvioida jatkuvan kasvatuksen käyttökelpoisuutta Lapin ja Pohjois-Suomen olosuhteissa. Tämä mahdollistaisi myös jatkuvan kasvatuksen ja tasaikäisen metsikön kasvatusketjujen kannattavuuksien aiempaa kattavamman vertailun, kun kasvu- ja tuotosvaikutusten lisäksi huomioidaan myös hakkuutyön tuottavuus, puunkorjuun kustannukset ja korjuujälki (Surakka & Sirén 2007, Ahtikoski ym. 2022).

Puunkorjuussa ja etenkin hakkuutyössä korjuutekniset tekijät, kuten poistuman määrä (m^3/ha), poistuman tiheys (runkoja/ha) ja poistettavien runkojen koko ($m^3/runko$) ja kokojakauma määrittävät pitkälti korjuutyön tuottavuuden ja kustannukset (Surakka & Sirén 2007). Poimintahakkuiden korjuuolosuhteet ovat useimmiten hyvät keskeisesti työn tuottavuuteen

vaikuttavien tekijöiden, eli hakkuupoistuman ja keskijäreiden osalta. Poimintahakkuihin soveltuvat verraten suuret hakkuukoneet, koska alustakoneelta vaaditaan vakautta ja nosturilta voimaa poistettavien puiden hallittuun kaatoon ja käsittelyyn (Surakka & Sirén 2007). Poimintahakkuun keskeiset ongelmat liittyvät korjuujälkeen, erityisesti alempien latvuserroksen puiden ja taimien selviytymiseen hakkuuvaiheessa.

Tasaikäisten metsien harvennuksissa puujaksojen pituusero on pieni, kun taas poimintahakkuissa poistettavien puiden koko vaihtelee, ja suuria puita kaadetaan selkeästi pienempien puiden päältä. Poimintahakkuissa jäävän puuston ja taimien varominen ja lisääntynyt suunnittelutarve hidastavat hakkuutyötä (Surakka & Sirén 2007, Nuutinen & Muhonen 2022). Pakkanen lisää erityisesti katkovaurioiden ja puiden karsiutumisen riskiä. Sulan maan aikaisessa korjuussa metsäkuljetuksen aiheuttamat maaperä- ja juuristovauriot ovat riski, koska hakkuuteitä kertymän usein vaihdellessa ja jakautuessa epätasaisesti ei saada kaikkiin kohtiin maaperää suojaamaan. Koneiden kuljettajilla on suuri vaikutus tuottavuuteen ja korjuujälkeen (Surakka & Sirén 2007, Nuutinen & Muhonen 2022). Kuljettajien merkitys korostuu poimintahakkuissa, joissa kohteen hahmottaminen, työn suunnittelu ja jäävän puuston varominen asettavat omat vaatimuksensa.

Poimintahakkuiden yleistymisen vaikutukset korjuulogiikkaan ja tuleviin hakkuumahdollisuuksiin riippuvat kohteiden määrästä, koosta, rakenteesta, käsittelyn voimakkuudesta ja jäljestä sekä etenkin kohteiden tulevasta metsänhoidollisesta kehityksestä (Surakka & Sirén 2007, Hynynen et al. 2022). Suurin epävarmuus poimintahakkuiden osalta liittyy tulevaisuuden korjuuolosuhteisiin, joihin lyhyellä aikajänteellä vaikuttavat hakkuun voimakkuus, korjuujälki ja toimenpiteiden jaksotus. Pitkällä aikajänteellä korjuuolosuhteisiin vaikuttavat puolestaan metsän kasvu ja uudistuminen (Surakka & Sirén 2007, Hynynen ym. 2022).

1.1. Tutkimuksen tavoitteet ja toteutus

Tässä raportoitavan tutkimushankkeen tavoitteena oli selvittää, miten jatkuvapeitteisessä metsäkasvatuksessa käytettävä poimintahakkuu vaikuttaa puunkorjuukustannuksiin ja korjuujälkeen Lapin ja Pohjois-Suomen olosuhteisissa, missä korjuuolosuhteet ovat muuta maata vaativammat arktisten olosuhteiden, pitkien etäisyyksien, keskimääräistä pienemmän hakkuukertymän (m^3/ha) ja muiden metsänkäyttötapojen takia.

Tavoitteena oli selvittää:

- Miten korjuukustannukset (puunkorjuun ajanmenekki, tuottavuus ja käyttötuntikustannukset) jatkuvan kasvatuksen kohteilla muodostuvat ja ovatko ne suuremmat kuin nykyisillä hakkuutavoilla?
- Hakkuupoistuman ja jäävän puuston rakenne sekä korjuujälki (korjuuvauriot puuston ja maaperään) poimintahakkuissa ja verrata sitä tasaikäisen metsikön hakkuutapoihin (alaharvennus, avohakkuu)

Korjuukustannusten vertailulaskelmat perustuivat tuottavuuden osalta olemassa oleviin metsäkuljetuksen ajanmenekkimalleihin (Nurminen ym. 2006), olemassa oleviin kustannuslaskentapohjiin (Uusitalo & Kivinen 2022) sekä tässä hankkeessa tuotettuihin hakkuun ajanmenekkimalleihin. Tutkimusta varten perustettiin koeleimikoita, joissa tehtiin koehakkuita vertailtavilla hakkuutavoilla (poimintahakkuu, alaharvennus ja avohakkuu) ja inventointiin puunkorjuun jäljiltä korjuujälki sekä jäävän puuston rakenne. Koeleimikoiksi valittiin kohteita, joissa oli

luonnostaan puuston eri-ikäisrakenteisuutta, ja joihin voitiin soveltaa sekä poimintahakkuuta että tasaikäisen metsikön hakkuutapoja.

Tutkimushankkeen toteutuksesta vastasi Luonnonvarakeskus (Luke) ja Lapin koulutuskeskus REDU. Hankkeen rahoittajana toimi Pohjois-Pohjanmaan elinkeino-, liikenne- ja ympäristökeskus ja hanke toteutettiin 01.05.2021–30.06.2023 välisenä aikana. Tutkimushakkuut järjestettiin Metsähallituksen talousmetsissä Rovaniemellä kesä- ja talviolosuhteissa. Aikatutkimuskoealojen puunkorjuu suoritettiin REDU:n toimesta ja tulosten vertailtavuuden varmistamiseksi metsäkonekalusto, samoin kuin koneenkuljettajalla olivat samat koko tutkimuksen ajan. Luke vastasi hakkuukokeiden tutkimusaineiston keruusta, analysoinneista, inventoinneista ja tulosten laskennasta sekä raportoinnista.

2. Aineistot ja menetelmät

2.1. Tutkimuksessa käytetty korjuukalusto

Hakkuutyö tehtiin 6-pyöräisellä John Deere 1170G hakkuukoneella (Kuva 1), jossa oli John Deere H413 hakkuulaite ja kärkiohjauksella (IBC) varustettu CH6 nosturi. Koneen kääntyvä ohjaamo seurasi nosturin puomin liikkeitä. Hakkuukone oli vuosimallia 2019 ja sillä oli ajettu noin 2000 käyttötuntia. Hakkuukoneen työpaino oli noin 20 000 kg, kun etutelin telojen, takarenkaiden ketjujen ja tankissa olevan polttoaineen paino otetaan huomioon. Hakkuukoneen 6-sylinterisen John Deere 6068 moottorin teho oli 155 kW (DIN). Nosturin maksimiulottuvuus oli 11.3 metriä ja bruttonostomomentti 165 kNm. John Deere H413 hakkulaitteen paino oli 940 kg. Hakkuulaitteen suurin sahakatkaisuläpimitta oli 580 mm maksimi avauma 560 mm ja suurin syöttönopeus 5,6 m/s. Karsimateriaa hakkulaitteessa oli 6 kappaletta ja syöttörullia 4 kappaletta. Hakkuulaitteen leveys syöttörullat ja karsimaterät avattuina oli 1450 mm ja korkeus kääntökehä mukaan lukien 1330 mm. Koneen kuljettajalla oli noin 20 vuoden työkokemus hakkuukonetyöstä ja hän oli hyvin harjaantunut kaikkiin tutkimuksessa mukana olleisiin hakkuutapoihin.



Kuva 1. Tutkimushakkuut tehtiin John Deere 1170G hakkuukoneella, joka oli varustettu H413 hakkuulaiteella.

Aikatutkimuskoealoilta hakatun puutavaran metsäkuljetus tehtiin 8-pyöräisellä Komatsu 845 kuormatraktorilla (Kuva 2), joka oli vuosimallia 2021. Kuormatraktorin työpaino oli teloilla varustettuna noin 21 000 kg ja kantavuus oli puolestaan 12 000 kg. Kuormatraktorin leveys oli 2 850 mm ja pituus 9 306 mm. Pituus etuakselista kuormatraktorin keskiniveleen oli 1 850 mm ja vastaavasti pituus keskinivelestä taka-akseliin oli 2 900 mm. Maavara oli keskiniveleen kohdalla 660 mm. Voimansiirto oli hydrostaattismekaaninen ja tietokoneohjattu. Kuormainen ulottuvuus oli 10 m.



Kuva 2. Aikatutkimuskoealoilta hakatun puutavaran metsäkuljetus tehtiin Komatsu 845 kuormatraktorilla.

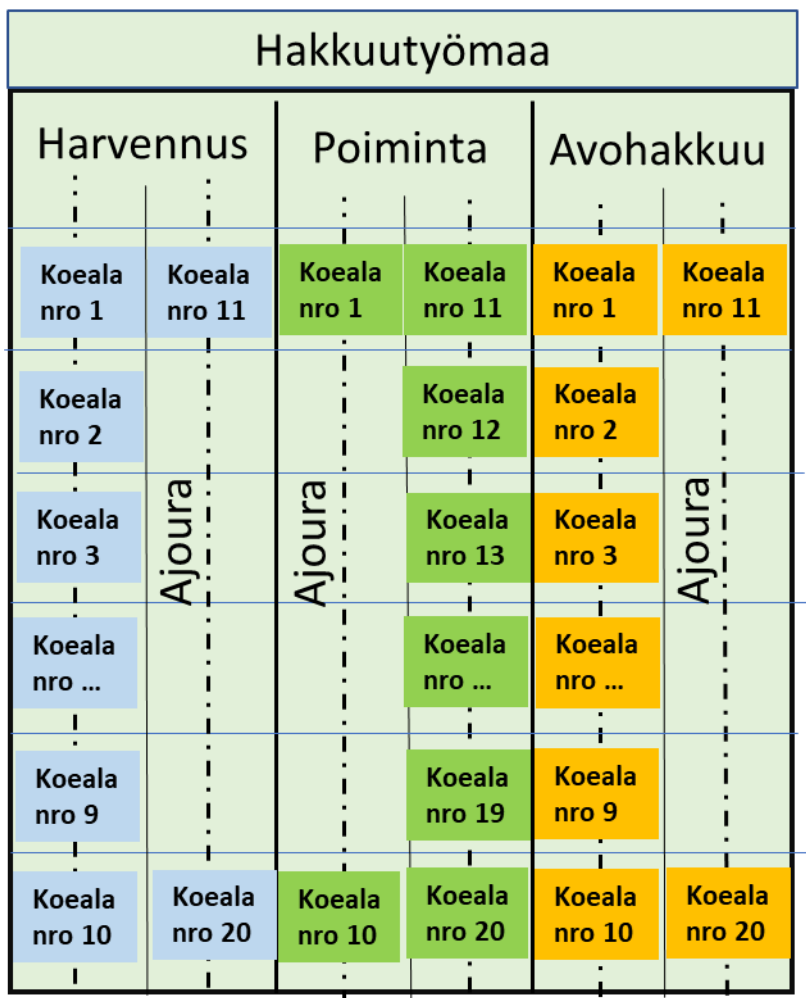
2.2. Hakkuukokeet ja aikatutkimus

2.2.1. Hakkuukokeiden toteutus

Hakkuukokeet järjestettiin kahdella työmaalla (Hirvas ja Kulmunkivaara), jotka molemmat sijaitsivat Rovaniemellä. Kesäolosuhteiden hakkuukoe toteutettiin Hirvaalla 27.–30.9.2021 ja talviolosuhteiden hakkuukoe Kulmunkivaaralla 28.–29.3.2022. Talvihakkuissa lämpötila oli -12–5 °C ja syksyllä toteutetuissa kesäkauden hakkuissa lämpötila oli 5–12 °C. Sekä talvi- että kesäolosuhteiden työmailla maasto oli loivaa ja hyvin kantavaa rinnemaastoa. Talvihakkuissa lumen paksuus oli 50–60 cm.

Tutkimukseen valituille hakkuutyömaille perustettiin yhteensä 118 suorakaiteen muotoista hakkuukoealaa, joiden pituus oli 25 metriä. Koealan leveys vastasi puolestaan hakkuukoneen

työskentelyleveyttä ko. hakkuutavalla. Harvennushakkuukoealoja oli 44, poimintahakkuukoealoja 42 ja avohakkuukoealoja 34. Harvennus- ja poimintahakkuut toteutettiin Metsähallituksen metsänhoito-ohjeiden mukaan. Harvennushakkuilla noudatettiin voimassa olevia harvennusmalleja (Metsänhoitosuosituksot 2019) ja hakkuunjälkeinen puuston tavoitepohjapinta-ala oli Hirvaalla 14 m²/ha ja Kulmunkivaaralla 12 m²/ha. Poimintahakkuissa jäävän puuston tavoitepohjapinta-ala oli 7–8 m²/ha. Perusteena oli metsänhoitosuosituksen mukainen minimipohjapinta-ala, lakiraja 6 m²/ha, johon lisättiin 1–2 m²/ha. Mänty tarvitsee taimettuakseen valoa, minkä vuoksi poimintahakkuukoealoilla tavoitettiin tiheys oli harvempi kuin mitä kuusella on totuttu.



Kuva 3. Periaatekuva aikatutkimuskoealojen rinnakkaisesta sijoittelusta hakkuutavan mukaan Hirvaksen ja Kulmunkivaaran hakkuutyömailla. Aikatutkimuskoealan pituus ajouran suunnassa 25 metriä.

Suorakaiteen muotoisten hakkuukoealojen päätyrajat merkittiin maastoon koneen etenemissuunnassa kuitunauhan ja merkkimaalin avulla. Ajourien paikkaa ei merkitty ennakkoon maaston, vaan niiden sijoittelu ja ajouravälin määrittely perustui kuljettajan omaan harkintaan sekä korjuusuositusten mukaiseen 20 metrin vähimmäisajouraväliin ja ajouran 4,5 metrin enimmäisleveyteen. Hakkuukoneen työskentelyleveys ja ajouraleveys selvitettiin jälkikäteen ajouravälimittausten yhteydessä. Hakkuutyömaiden valinnan ja hakkuukoealojen maastoon sijoittelun tavoitteena oli, että puiden runkotilavuus ja hakkuupoistuman tiheys vaihtelevat hakkuukoealojen välillä. Hakkuutyömaalla aikatutkimuskoealat sijoitettiin siten, että

ensimmäisenä hakattiin kaksi ajouraväliä harvennushakkuuta, jonka jälkeen em. harvennusalueen rinnalle hakattiin vastaavanlaiset pistourat poimintahakkuuseen ja avohakkuuseen pohjautuvilla hakkuutavoilla kuvion muodon, pinta-alan ja maaston sallimissa puitteissa (Kuva 3).

Hakkuukokeessa havukuitupuun minimi latvaläpimitta oli 6 cm ja katkonnan ohjepituus oli 3,0–5,5 metriä. Havukuitupuuhun luettiin mukaan mänty ja kuusi. Koivukuitupuulla pölkyt katkottiin 3,0 metrin määrämittaan ja minimi latvaläpimitta oli 6 cm. Mänty- ja kuusitukilla minimi latvaläpimitta oli 15 cm. Männyllä katkontapituudet olivat 3,7–5,5 metriä ja kuusella 4,0–5,5 metriä. Lisäksi sahapuuksi korjattiin mänty pikkutukkia, jonka katkontapituudet 12 cm minimilatvaläpimitalla olivat 3,7–5,5 metriä. Harvennushakkuukoealoilta hakattiin eri puutavara-lajeja yhteensä 162,0 m³, poimintahakkuukoealoilta 209,0 m³ ja avohakkuukoealoilta 219,0 m³. Puutavaran mittaus perustui hakkuukoneen mittalaitteen tuottamaan tietoon aikautkimuskoealoilta hakattujen runkojen ja rungoista katkottujen puutavarylajien dimensioista ja tilavuuksista. Hakkuukoneen mittalaitetiedot talletettiin hakkuutavoittain omina tiedostoina hpr-tiedostomuodossa aina sen jälkeen, kun kyseisen hakkuutavan aikautkimuskoealat olivat ko. työmaalla saatu hakattua loppuun.

2.2.2. Aikatutkimuksen toteutus

Aikatutkimuksessa käytetty videoaineisto kerättiin videoimalla hakkuutyö hakkuukoneen ohjaamoon kiinnitetyllä GoPro7-videokameralla, joka oli kiinnitetty hakkuukoneen ohjaamon sisäpuolelle etulasin oikeaan alareunaan. Videokamera käynnistettiin työpäivän alussa ja sammutettiin kun työpäivä päättyi. Hakkuut tehtiin päivänvalossa kello 7:30–16:00 välisenä aikana. Hakkuukonetyöstä koottu videoaineisto analysoitiin jatkuvaan kelloaikautkimukseen ja havainnointiin perustuvalla menetelmällä, missä työvaiheet kirjattiin niiden vaihtumisajankohdan mukaan. Työvaiheiden ajanmenekit tallennettiin Rufco 901-maastotietokoneella, jolla kirjaaminen tapahtui sekunnin kymmenesosan tarkkuudella. Videokuvaan perustuneissa aikautkimuksissa hakkuukoneen työskentelyaika jaettiin seuraaviin hakkuukonetutkimuksissa yleisesti käytettyihin työvaiheisiin:

- Työpistesiiro hakkuu-uralla
- Vienti
- Kaato uralla
- Kaato sivulla
- Tuonti, karsinta ja katkonta
- Kasaus ja järjestely
- Peruuttelu pistolta
- Raivaus
- Häiriöt ja keskeytykset
- Aikatutkimuskoealan vaihtuminen (=merkkimaali ja kuitunauha merkinnät maastossa)

Aikatutkimuksissa eroteltiin ajouralta ja ajouran välialueelta kaadetut rungot toisistaan, jotta voitiin arvioida hakkuupoistuman suuruus ajouralta ja ajourien väliseltä alueelta. Hakkuupoistuman ajouran ja välialueen välinen jakauma saatiin laskettua siinä vaiheessa, kun runkokohdaiset aikautkimustiedot yhdistettiin mittalaitteen tuottamaan runkokohtaiseen tilavuustietoon (m³). Työvaihejaottelussa raivaus tarkoitti alle ainespuumittaisten runkojen kaatoa, jotka haittasivat tai oletettiin haittaavan hakkuukoneen ja metsätraktorin liikkumista ja työskentelyä ajouralta käsin. Aikatutkimuksissa raivaustyö kohdistui pääsääntöisesti ajouralla sijanneisiin runkoihin. Hakkuutyön yhteydessä hakkuukone teki ajoittain lyhyitä pistoja, kun kaadettiin etäällä ajourasta sijaitsevia puita harvennuksella ja poimintahakkuulla. Työvaihejaottelussa

pistoihin käytetty aika luettiin eteenpäin ajon osalta työpistesiiirron ajanmenekkiin ja uralle paluun osalta peruuttamiseen. Häiriöihin ja keskeytyksiin luettiin kaikki varsinaiseen hakkuutyöhön liittymätön aika, kuten kuljettajan tauot, kontrollimittaukset, puhelut yms.

2.2.3. Aikatutkimusaineiston analysointi ja hakkuutyön mallinnus

Aikatutkimusaineiston analysointia varten maastotietokoneelle kerätty aineisto täsmätettiin vastaamaan hakkuukoneelta tallennettua hpr-tilavuustietoa runkotasolla, jotta hakkuutyön ajanmenekkiä pystyttiin tarkastelemaan rungon tilavuuden suhteen. Työpistesiiirtojen ja pistolta peruuttelun ajanmenekki määritettiin aluksi aikatutkimuskoealakohtaisesti, jonka jälkeen se muutettiin runkokohtaiseksi ajanmenekiksi aikatutkimuskoealalta hakattujen runkojen lukumäärän perusteella. Hakkuukoneen työvaiheiden ajanmenekin mallinnuksessa työvaiheet koottiin kahdeksi päätyövaiheeksi, jotka olivat: työpistesiiirtyminen ja hakkuu. Työpistesiiirron ajanmenekkiä selitettiin hakkuupoistuman tiheydellä ja hakkuun ajanmenekkiä rungon käyttöosan tilavuudella.

Työpistesiiirron ajanmenekissä oli mukana hakkuukoneen siirtymiset hakkuu-uralla & pistot sivuille. Hakkuun ajanmenekissä mukana hakkuulaitteen vienti kaadettavan puun tyvelle, puun kaato, karsinta sekä katkonta mitta- ja laatuvaatimusten mukaisiksi puutavaralajeiksi. Puutavaran kasaukseen ja järjestelyihin sekä ajouran raivaukseen käytetty aika määritettiin runkokohtaisena keskiarvona kaikille tutkimuksessa mukana olleille hakkuutavoille. Aikatutkimusaineiston analysointi, mallinnus ja luotujen mallien testaus (F-testi ja t-testi $p < 0,05$) tehtiin IBM SPSS Statistics 21.0 ohjelmistolla.

2.3. Korjuujäljen ja puustotietojen inventointi

2.3.1. Puuston inventointi

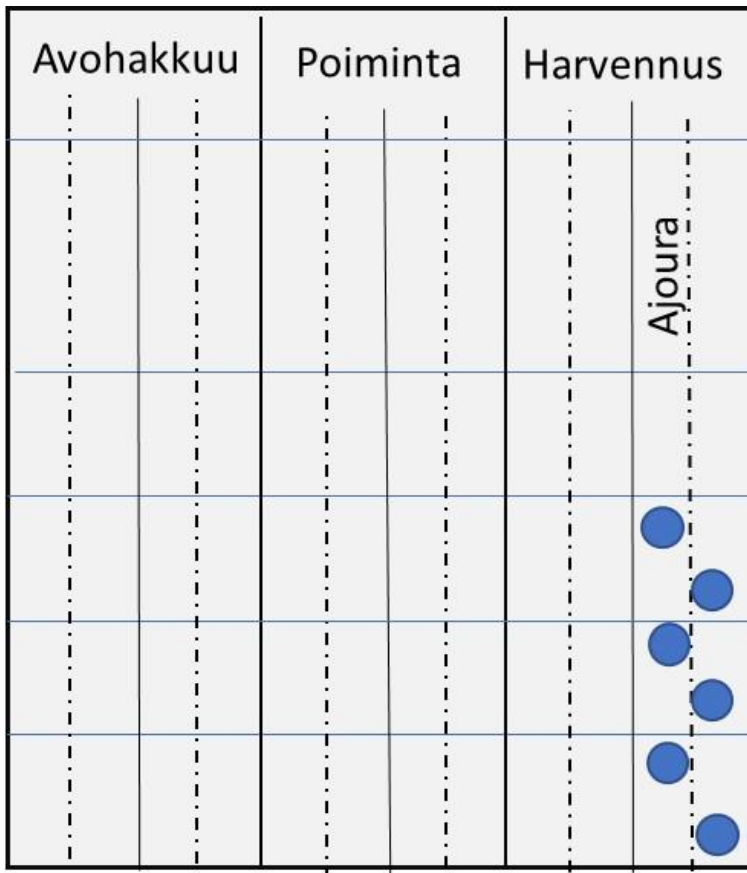
Koeleimikoiden puusto mitattiin ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen. Puuston määrä ennen hakkuuta arvioitiin relaskoopikoealoilta. Koealat sijoitettiin merkittyjen hakkuulinjojen väliin leimikon keskilinjan molemmin puolin noin 40 metrin etäisyydelle toisistaan. Relaskoopikoealojen määrä Kulmunkivaaralla oli 24 kpl ja Hirvaalla 20 kpl.

Hakkuun jälkeen puuston määrä, rakenne ja korjuuvauriot arvioitiin harvennus- ja poimintahakkuulohkoilla systemaattisella koeala-arvioinnilla. Maastomittaukset tehtiin kesäkuussa 2022. Kullekin aikatutkimuskoealalle sijoitettiin kaksi ympyräkoealaa (säde 5.64 m) siten, että koealan ulkoreuna oli ajouran keskilinjalla ja kumpikin koeala sijaitsi eri puolella ajouraa (Kuva 4). Hirvaalla koealaoja kertyi 44 kpl per hakkuutapa ja Kulmunkivaaralla 40 kpl.

Koealalta luettiin kaikki puut ja kannot. Kaikista puista mitattiin rinnankorkeusläpimitta (ristimittaus) 1 mm:n tarkkuudella ja arvioitiin korjuuvauriot. Koepuista (2–3 per koeala) mitattiin pituus ja kantoläpimitta. Lisäksi mitattiin läpimitat koehakkuussa kaadettujen puiden kannoista. Korjuuvaurioiden arvioinnissa käytettiin Metsäkeskuksen ohjeistusta (Tarkastusohje 2022):

- Puuaines on rikkoontunut tai latva on poikki
- Puun kuori on nilakerrokseen saakka yhdestä tai useammasta kohdasta rinnankorkeuden alapuolelta yhteensä yli 12 cm²:n laajuudelta
- Puun kuori on vaurioitunut koko rungon alueelta yhteensä 30 cm²:n laajuudelta

- Juurissa huomioidaan vauriot, jotka ovat enintään yhden (1) metrin päässä rungon keskipisteestä



Kuva 4. Periaatekuva ympyräkoealojen sijoittelusta hakkuukoealoille.

2.3.2. Ajouravälin ja -leveyden mittaus

Ajouravälin ja -leveyden mittaukset tehtiin 25 metrin määräväleillä, eli em. tunnuksella määritettiin aikatutkimuskoealoittain 10 cm tarkkuudella. Mittaustuloksissa ajouran leveydellä (cm) tarkoitetaan ajouraa reunustavien lähimpien puiden kylkien kohtisuoraa etäisyyttä uran keskelle ja ajouravälillä (m) puolestaan kahden rinnakkaisen ajouran keskilinjojen välistä kohtisuoraa etäisyyttä toisistaan (Tarkastusohje 2022). Ajouraleveys mitattiin aikatutkimuskoealan puoliväliin sijoitulta 10 metrin jaksolta määrittämällä uran oikealta ja vasemmalta puolelta lähimmän puun etäisyys ajouran keskilinjaan ja summaamalla nämä kaksi etäisyyttä yhteen (Tarkastusohje 2022). Ajouraväli määritettiin puolestaan aikatutkimuskoealojen päätyrajan kohdalla, mitkä olivat helppo havaita kuitunauha ja maalimerkintöjen ansiosta myös koehakkuiden jälkeen.

2.4. Korjuukustannusten laskenta

2.4.1. Polttoaineen kulutuksen mittaus

Polttoaineen kulutuksen mittaus perustui hakkuukoneen käytön aikaseurantajärjestelmän tuottamaan tietoon polttoaineen tunti- ja kokonaiskulutuksesta ko. hakkuutavalla kyseisellä

työmaalla. Tulosanalyyseissä kiintokuutiometripohjainen polttoaineen kulutus (litraa per m³) laskettiin jakamalla hakkuutapakohtainen polttoaineen kulutus ko. hakkuutavalla hakatun ai-nespuun määrällä.

2.4.2. Metsäkoneiden tuntikustannuslaskenta

Metsäkoneiden (hakkuukone ja kuormatraktori) tuntikustannuslaskenta perustui yleisesti käytettyyn metsäkoneiden kustannuslaskentatapaan, jossa koneiden kiinteät pääomakustannukset yms. jaettiin koneen käyttäjälle (vuosille) ja muuttuvat käyttö- ja palkkakustannukset laskettiin kustannuksiin suoraan vuotuisen käyttötuntimäärän perusteella. Laskelmassa hakkuukoneen ja kuormatraktorin vuotuiset käyttöajat olivat 2 699 ja 2864 tuntia. Koneiden pitoaika ennen vaihtoa oli hakkuukoneella 17 500 ja kuormatraktorilla 17 000 käyttötuntia. Laskelmassa hakkuukone ja kuormatraktori edustivat ns. yleiskonekoluokkaa, eli koneet pystyvät toimimaan kaikilla vertailtavilla hakkuutapakohteilla.

Taulukossa 1 on esitetty hakkuukoneen ja kuormatraktorin tuntikustannuslaskennassa käytetyt kustannustekijät ja arvot, sekä niille lasketut kone ja hakkuutapakohtaiset tuntikustannukset (Uusitalo & Kivinen 2022). Tuntikustannuslaskennassa käytetyt arvot (ALV 0 %) vastaavat vuodenvaihteen 2022–2023 hintatasoa ja hakkuutapakohtaiset hakkuutyön polttoaineen kulutusluvut ovat peräisin tästä tutkimuksesta. Tuntikustannuslaskennassa polttoaineen kulutusluku- jen osalta oletettiin, että hakkuutyöstä 40 % tehdään kesäolosuhteissa ja 60 % talviolosuhteissa. Metsäkoneiden tuntikustannuslaskennassa käytettiin Helsingin yliopiston metsätieteiden osaston Metsäkoneopin oppimisympäristössä (Uusitalo & Kivinen 2022) olevia julkisia Excel-pohjia hakkuukoneen ja kuormatraktorin tuntikustannusten laskentaan (<https://puuhuolto.fi/metsa-koneoppi/konekustannuslaskenta/>). Tämä siksi, että raportin lukija voi tarvittaessa tehdä omaa päätöksentekoa tilannettaan vastaavat laskelmat em. metsäkoneiden käyttötuntikustannuksista.

Taulukko 1. Hakkuukoneen ja kuormatraktorin käyttötuntikustannuslaskelma (Uusitalo & Kivinen 2022).

Käyttötuntilaskelman laskentaperusteet	Hakkuukone	Kuorma- traktori
Pääomakustannustekijät:		
Koneen uushankintahinta lisävarustein, €	420 000	265 000
Koneen pitoajan käyttötunnit, h	17 500	17 000
Koneen pitoaika, v	6,6	6,7
Koneen arvonaleneminen vuodessa, %	20	16
Koneen jäännösarvo vaihdossa uuteen, €	96 304	82 398
Koneen huoltovälineistö, €	13 000	9 000
Koneen käyttöpääoma	30 000	20 000
Korko, %	1,77	1,77
Vuosityöajan laskentaperusteet:		
Työvuororakenne: 1-vuorossa, kk/v	4	4
: 2-vuorossa, kk/v	7	7
Työviikot vuodessa, viikkoa	44	44
Koneen seisonta-aika vuodessa, viikkoa	8	8
Työvuoron pituus, h	8,3	8,3
Työpäiviä kuukaudessa, kk	21,3	21,3
Työpäiviä yhteensä vuodessa, kpl	234	234
Työvuoroja yhteensä vuodessa, kpl	383	383
Työmaa-aika vuodessa, h	3175	3182
Käyttöaika vuodessa, h	2699	2864
Muu työmaa-aika vuodessa, h	476	318
Siirtoaika vuodessa, h	200	138
Kokonaistyöaika vuodessa, h	3375	3320
Työvoimakustannustekijät:		
Kuljettajan perustuntipalkka, €/h	17,71	15,25
Iltavuorolisä, €/h	1,11	1,11
Välilliset palkkakustannukset, %	53	53
Kilometrikorvaus työmatkoista, €/km	0,46	0,46
Muuttuvat kustannustekijät:		
Polttoaineen hinta, €/litra	1,60	1,60
Polttoaineen kulutus käyttötunnissa, l	15,87_16,64_17,32	12,00

Käyttötuntilaskelman laskentaperusteet	Hakkuukone	Kuorma- traktori
Polttoainekustannukset käyttötunnissa, €	25,39_26,62_27,71	19,20
Moottoriöljyn hinta, €/l	3,50	3,50
Moottoriöljyn kulutus käyttötunnissa, l	0,20	0,10
Moottoriöljyn käyttötuntikustannukset, €	0,70	0,35
Vaihteistoöljyn hinta, €/l	3,30	3,30
Vaihteistoöljyn kulutus käyttötunnissa, l	0,10	0,10
Vaihteistoöljyn käyttötuntikustannukset, €	0,33	0,33
Hydrauliöljyn hinta, €/l	3,00	3,00
Hydrauliöljyn kulutus käyttötunnissa, l	0,20	0,20
Hydrauliöljyn käyttötuntikustannukset, €	0,60	0,60
Teräketjuöljyn hinta, €/l	1,92	-
Teräketjuöljyn kulutus käyttötunnissa, l	0,57	-
Teräketjuöljyn käyttötuntikustannukset, €	1,09	-
Laipan hinta, €	53	-
Laipan kesto, kpl/käyttötunti	0,02	-
Laipan käyttötuntikustannukset, €	1,06	-
Teräketjun hinta, €	15,00	-
Teräketjun kesto, kpl/käyttötunti	0,06	-
Teräketjun käyttötuntikustannukset, €	0,83	-
Värimerkkausaineen hinta, €	1,07	-
Värimerkkausaineen käyttötuntikulutus, l	0,30	-
Värimerkkausaineen käyttötuntikustannus, €	0,32	-
Korjaus ja huolto, % uushankintahinnasta	29,00	29,00
Korjauksen ja huollon käyttötuntikustannus, €	6,84	4,00
Koneen siirtokustannus, €/km	2,50	2,50
Kiinteät kustannukset, €/vuosi		
Pääoman poistot	51 015	28 597
Korkokustannukset	5 215	3 508
Kiinteistökulut	3 100	3 100
Vakuutusmaksut	2 027	1 840
Hallinto- ja työjohtokustannukset	8 321	6 150
Yhteensä	69 678	43 195

Käyttötuntilaskelman laskentaperusteet	Hakkuukone	Kuorma- traktori
Työvoimakustannukset, €/vuosi		
Työmaa-ajan palkka	56 225	48 529
Iltavuorolisä	660	662
Siirtotyöajan palkka	3 542	2 105
Palkan sivukustannukset	32 208	27 187
Kulkemiskorvaukset	15 836	15 873
Työterveys, koulutus & ateriakorvaukset	4 493	3 570
Yhteensä	112 963	96 875
Muuttuvat kustannukset, €/vuosi		
Polttoaine	68 521 71 846 74 782	54 989
Moottoriöljy	1 889	1 002
Vaihteistoöljy	891	945
Hydrauliöljy	1 619	1 718
Teräketjuöljy	2 953	-
Laipat	2 860	-
Teräketjut	2 226	-
Värimerkkaus	863	-
Korjaus ja huolto	18 455	11 470
Siirrot	21 625	21 621
Yhteensä	121 902 125 227 128 163	91 746
Kustannukset yhteensä, €/vuosi	304 543 307 868 310 804	231 816
5 % riskimarginaali	15 227 15 393 15 540	11 591
Käyttötuntikustannus, €/h	118,50 119,79 120,93	84,99

2.4.3. Korjuukustannusten laskenta hakkuutavoittain

Korjuukustannuslaskennassa hakkuun tuottavuus eri hakkuutavoilla laskettiin tässä tutkimuksessa tuotettujen hakkuun ajanmenekkimallien avulla (=puulajista riippumattomat yleismallit). Em. ajanmenekkimalleilla lasketut harvennus- poiminta- ja avohakkuun tehotuntuottavuudet (m^3/E_0h) muutettiin käyttötuntuottavuudeksi ($m^3/E_{15}h$) kertoimella 1.276 (Väätäinen ym. 2007). Korjuukustannuslaskennassa hakkuukoneen käyttötuntikustannus oli harvennushakkuilla 118,50 €, poimintahakkuilla 119,79 € ja avohakkuilla 120,93 € (Taulukko 1).

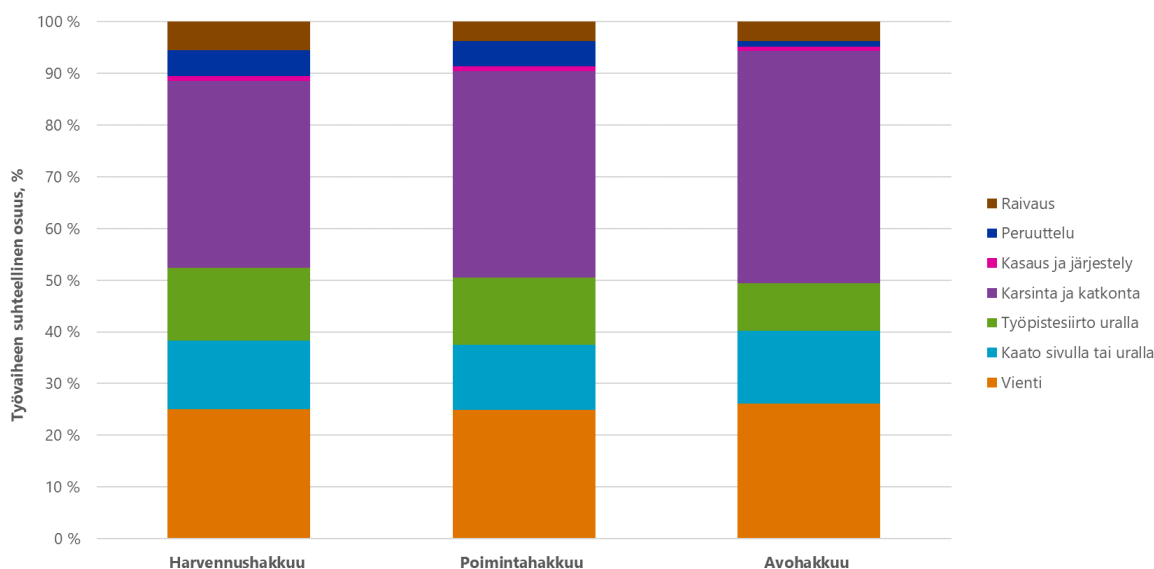
Metsäkuljetuksen tuottavuudet laskettiin Nurmisen ym. (2006) ajanmenekkimalleilla, joissa metsäkuljetuksen ajanmenekkiä selitetään hakkuupoistuman määrällä (m^3/ha), metsäkuljetusmatkalla (m), puutavaralajien lukumäärällä ja kuormatraktorin kuormakoolla (m^3). Korjuukustannuslaskennassa metsäkuljetusmatka (300 metriä) ja kuormatraktorin käyttötuntikustannus (84,99 €) olivat samat kaikilla vertailtavilla hakkuutavoilla (Taulukko 1). Harvennus- ja poimintahakkuilla kuormatraktorin kuormakoko oli 11, 0 m^3 ja vastaavasti avohakkuilla 14,0 m^3 . Puutavaralajit kuljetettiin sekakuormia ja metsäkuljetuksen tehotuntuottavuudet muutettiin käyttötuntuottavuudeksi 1,224 (Väätäinen ym. 2007) kaikilla vertailtavilla hakkuutavoilla. Harvennus- ja poimintahakkuilla ajouraa oletettiin olevan 600 metriä hehtaarilla ja avohakkuilla 650 metriä hehtaarilla. Harvennus- ja poimintahakkuiden metsäkuljetuksen tuottavuuden mallintamisessa käytettiin samaa harvennushakkuiden metsäkuljetukselle tarkoitettua ajanmenekkimallia.

Vertailulaskelmien korjuuolosuhteet johdettiin aikatutkimuskoealatiетоjen pohjalta. Aikatutkimuskoealoittain lasketut tulokset ($€/m^3$) esitettiin työvaiheittain ja kokonaiskustannuksina eri hakkuutavoilla. Tuloksissa hakkuun kustannus ($€/m^3$) esitettiin rungon käyttöosan koealakoh- taisen keskitilavuuden (m^3) mukaan ja metsäkuljetuksen kustannus koealakohtaisen hakkuukertymän (m^3/ha) mukaan. Puunkorjuun kokonaiskustannus (hakkuu ja metsäkuljetus) tienvarsivarastolla esitettiin puolestaan sekä koealakohtaisen keskitilavuuden (m^3) että koealakohtaisen hakkuukertymän (m^3/ha) mukaan.

3. Tulokset

3.1. Työvaiheiden suhteelliset ajanmenekit

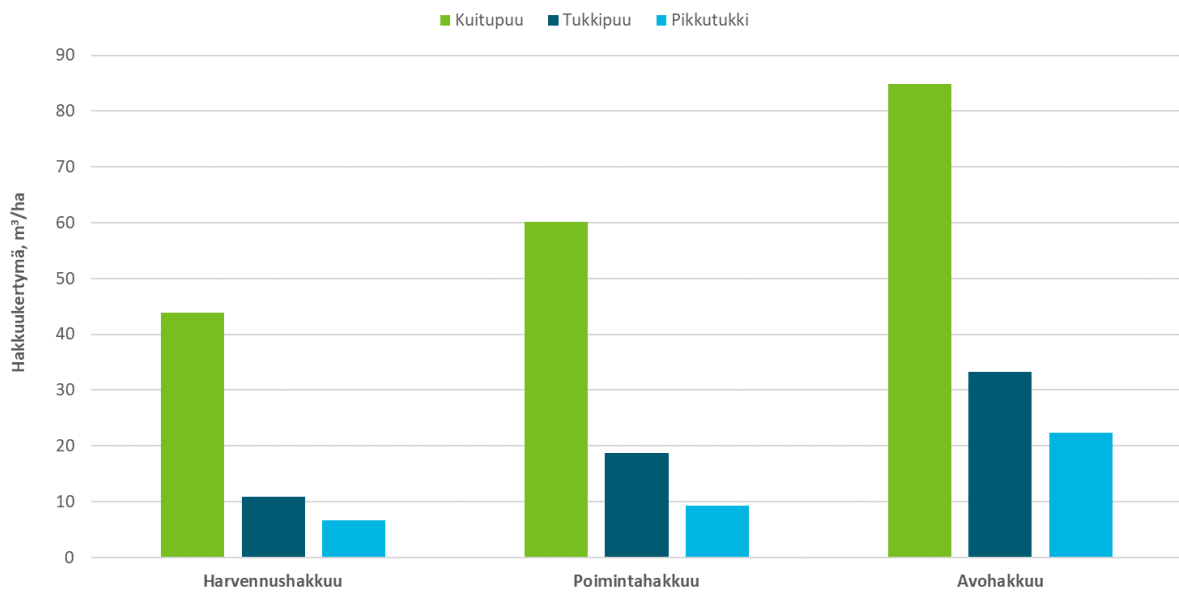
Aikatutkimuksessa käytetyllä työvaihejaottelulla hakkuulaitteen puun tyvelle viennin osuus tehotyöajasta oli hakkuutavasta riippumatta noin neljännes (25–26 %). Vastaavasti puun kaadon suhteellinen osuus tehoajanmenekistä oli 13–14 % (Kuva 5). Karsinnan ja katkonnan osuus tehoajasta oli hakkuutavasta riippuen 36–45 %. Avohakkuulla em. puun prosessointiin käytetyn työvaiheen suhteellinen osuus oli korkein ja harvennushakkuulla matalin. Hakkuukoneen työpistesiiirtoihin kului avohakkuulla tehotyöajasta 9 %, poimintahakkuulla 13 % ja harvennushakkuulla 14 %. Vastaavasti peruutteluun kului harvennus- ja poimintahakkuilla 5 % ja avohakkuilla 1 % tehotyöajasta. Syynä peruutteluun oli kuljettajan työtapa, jossa tehtiin pistoja ajouralta. Pistojen teko mahdollisti sen, että ajourien välialueet voitiin harventaa kattavasti ja ajourien välinen etäisyys oli vähintään 20 metriä harvennus- ja poimintahakkuiden jäljiltä. Ajouran rai-vaukseen käytettiin avo- ja poimintahakkuilla 4 % ja harvennushakkuulla puolestaan 6 %. Puutavarankasaukseen, lajitteluun ja järjestelyyn kului kaikilla hakkuutavoilla 1 % tehotyöajasta (Kuva 5).



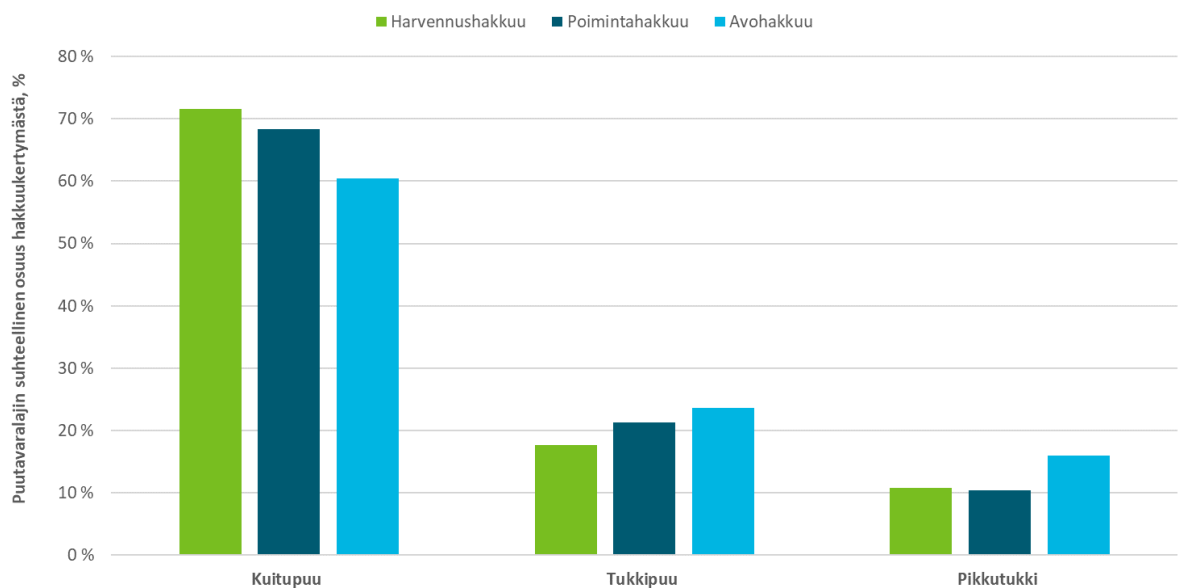
Kuva 5. Työvaiheiden suhteellinen osuus tehoajanmenekistä tutkituilla hakkuutavoilla.

3.2. Hakkuukertymä puutavaralajeittain

Hakkuukertymän keskiarvo aikatutkimuskoealoilla oli harvennushakkuulla 61,3 m³/ha, poimintahakkuulla 88,1 m³/ha ja avohakkuulla 140,4 m³/ha (Kuva 6). Hakkuutavasta riippumatta yli puolet (43,8–84,8 m³/ha) hakkuukertymästä oli kuitupuuta. Kuitupuun suhteellinen osuus (Kuva 7) hakkuukertymästä oli suurin harvennushakkuulla (70 %) ja vastaavasti pienin avohakkuulla (60 %). Pääosa kuitupuusta (35,9–71,6 m³/ha) oli mäntyä. Koivun (0,9–3,1 m³/ha) ja kuusen (5,5–10,2 m³/ha) osuus kuitupuukertymästä oli pieni (Kuva 8).

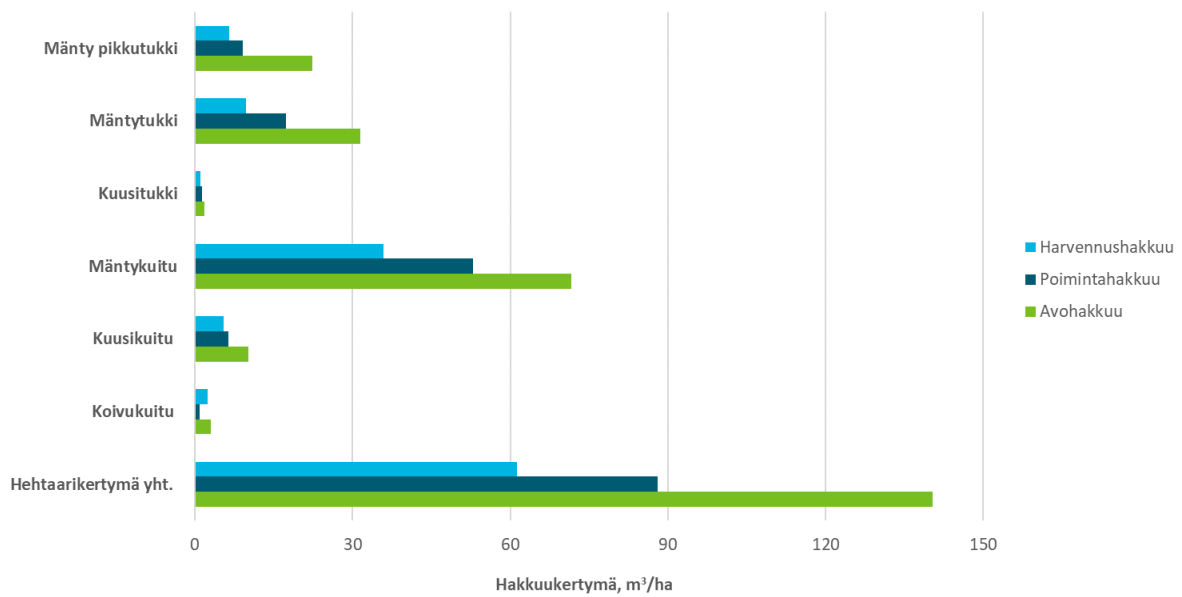


Kuva 6. Puutavaralajikohtainen hakkuukertymä eri hakkuutavoilla koehakkuiden perusteella. Hakkuukertymän keskiarvo aikatutkimuskoealoilla, m³/ha.

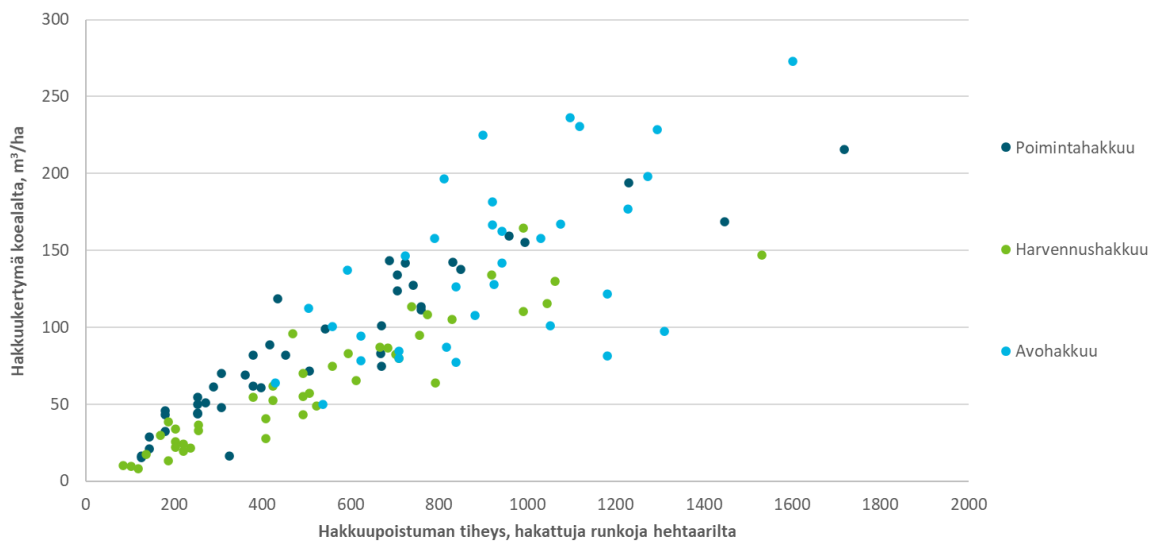


Kuva 7. Puutavaralajien suhteellinen osuus (%) hakkuukertymästä aikatutkimuskoealoilla eri hakkuutavoilla koehakkuiden perusteella.

Tukin ja pikkutukin hakkuukertymän keskiarvo aikatutkimuskoealoilla oli 10,8–33,2 m³/ha ja 6,6–22,4 m³/ha. Tukin ja pikkutukin suhteellinen osuus oli suurin avohakkuulla (24 % ja 16 %) ja vastaavasti pienin harvennushakkuulla (18 % ja 11 %). Pääosa tukista (9,8–31,4 m³/ha) ja pikkutukista (6,6–22,4 m³/ha) oli mäntyä. Kuusen osuus tukkikertymästä (1,0–1,8 m³/ha) oli mäntyyn verrattuna pieni (Kuva 8).



Kuva 8. Puutavaralaji kohtainen hakkuukertymä eri hakkuutavoilla koehakkuiden perusteella. Hakkuukertymän keskiarvo aikatutkimuskoealoilla, m³/ha.

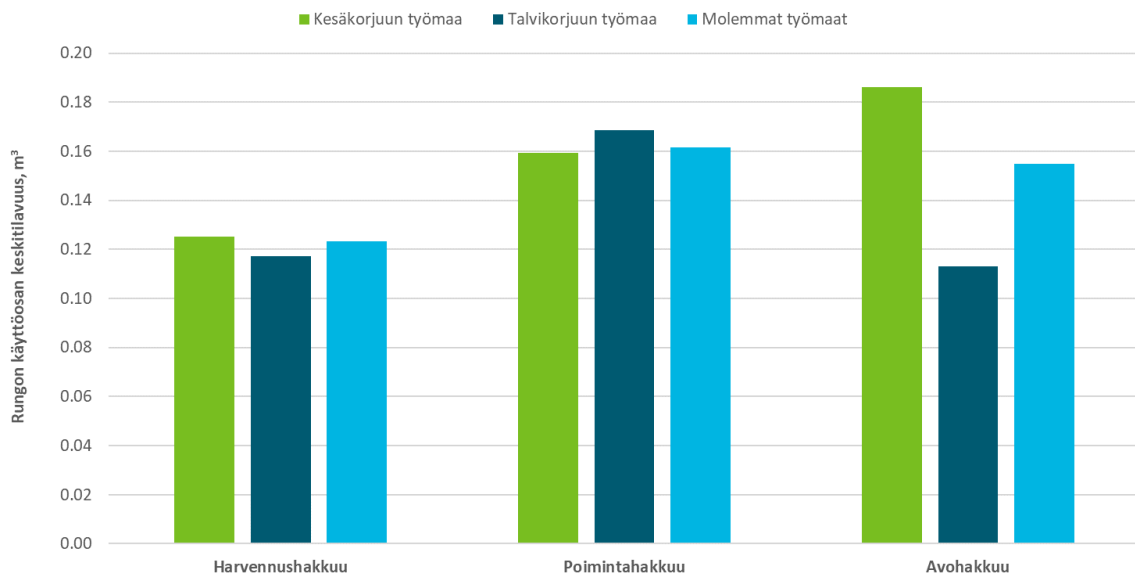


Kuva 9. Koelakohtainen hakkuukertymä (m³/ha) ja hakkuupoistuman tiheys (runkoja/ha) aikatutkimuskoealoilla eri hakkuutavoilla.

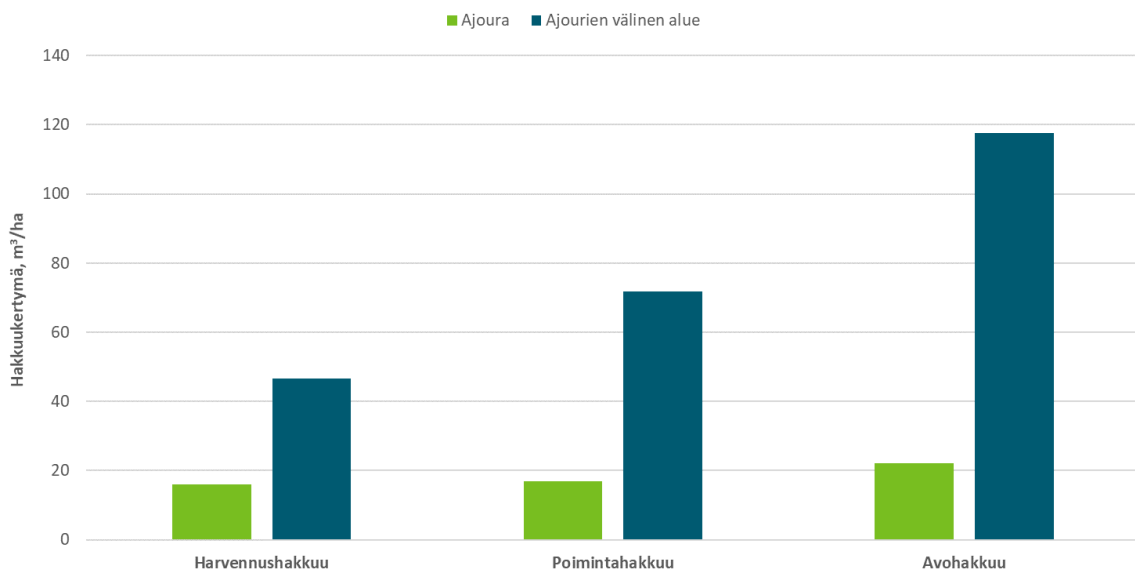
Kuvassa 9 on esitetty koelakohtainen hakkuukertymä (m³/ha) ja hakkuupoistuman tiheys (runkoja/ha) aikatutkimuskoealoilla eri hakkuutavoilla. Aikatutkimuskoealojen mukaisissa korjuolosuhteissa hakkuupoistuman hehtaartiheys vaihteli harvennushakkuilla 85–1532 rungon, poimintahakkuilla 126–1718 rungon ja avohakkuilla 430–1601 rungon välillä (Kuva 9). Vastaavasti hakkuukertymän vaihteli harvennushakkuilla 8–164 m³/ha välillä, poimintahakkuilla 15–215 m³/ha välillä ja avohakkuilla 50–273 m³/ha välillä. Kuvasta 9 käy hyvin ilmi poimintahakkuun ja perinteisen harvennushakkuun puuvalinnan vaikutus hakkuukertymään, eli samalla hakkuupoistuman tiheydellä poimintahakkuiden hakkuukertymä oli pääsääntöisesti suurempi. Poimintahakkuissa poistettavien puiden valinta tehdään yläharvennusperiaatteella, eli ensisijaisesti korjataan järempiä tukkipuita sekä heikkolaatuisia puita. Alaharvennuksessa

puolestaan poistetaan valtapuita pienemmät puut sekä vialliset, huonolaatuiset ja heikkokuntoiset puut, joilla ei em. syistä johtuen ole mahdollisuuksia kehittyä arvokkaiksi ja järeiksi rungoiksi.

Rungon käyttöosan keskitilavuus oli harvennushakkuun tutkimustyömailla 0,12–0,13 m³, poimintahakkuun tutkimustyömailla 0,16–0,17 m³ ja avohakkuun tutkimustyömailla 0,11–0,19 m³ (Kuva 10). Avohakkuulla rungon käyttöosan keskitilavuutta poimintahakkuuseen verrattuna laski se, että aikatutkimuskoealalta hakattiin kaikki ainespuun mitta- ja laatuvaatimukset täyttävät rungot. Tutkimuksesta johtuen aukoksi hakattiin myös keskenkasvuisia pienipuustoisia koealoja, joiden puuston olisi normaalisti annettu järeytyä isommaksi.



Kuva 10. Rungon käyttöosan keskitilavuus hakkuutavoittain tutkimustyömailla. Kesäkorjuun työmaa = Hirvas ja talvikorjuun työmaa = Kulmunkivaara.



Kuva 11. Hakkuukertymä ajouralta ja ajourien väliseltä alueelta eri hakkuutavoilla koehakkuiden perusteella. Hakkuukertymän keskiarvo aikatutkimuskoealoilla, m³/ha.

Ajouran vaikutus suhteelliseen hakkuukertymään oli suurin harvennushakkuulla, jossa neljäsosa hakkuukertymästä oli peräisin ajouralta (Kuva 11). Poimintahakkuulla viidesosa ja avohakkuulla noin kuudesosa hakkuukertymästä oli peräisin ajouralta. Hehtaarikohtaisena hakkuukertymänä ajouralta poistui puuta 16,0–22,0 m³/ha. Harvennushakkuulla ajouralta korjatun puuston hakkuukertymä oli 16,0 m³/ha, poimintahakkuulla 16,9 m³/ha ja avohakkuulla 22,0 m³/ha (Kuva 11).

3.3. Korjuujälki ja puuston rakenne

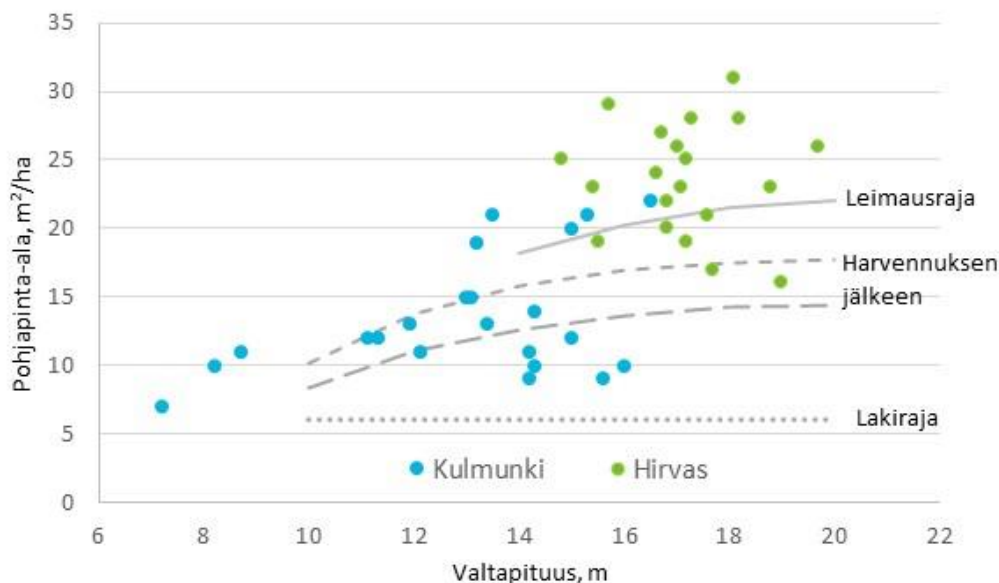
3.3.1. Puuston rakenne

Hirvaan puusto edusti tyypillistä ylitiheää männikköä, jossa ensiharvennus oli tekemättä. Puuston pohjapinta-ala ennen hakkuuta ylitti harvennussuosituksen mukaisen leimausrajan ollen keskimäärin 21,9 m²/ha (Kuva 12). Kulmunkivaaralla puustoa oli aiemmin todennäköisesti käsitelty poimintahakkuilla tai siellä on ollut myrskytuho, jonka seurauksena puusto oli aukkoinen edustaen selkeämmin eri-ikäisrakenteisen puuston rakennetta. Puuston pohjapinta-ala ennen hakkuuta oli alhainen, keskimäärin 12,4 m²/ha, mikä on selvästi alle harvennussuosituksen mukaisen leimausrajan ja vastaa pikemminkin harvennuksen jälkeistä puuston määrää (Kuva 12).

Taulukko 2. Puustotunnukset ennen hakkuuta.

	Hirvas	Kulmunkivaara
Runkoluku, N/ha	1 175	819
Pohjapinta-ala, m ² /ha	21,9	12,4
Tilavuus, m ³ /ha	202,4	91,6
Keskipituus, m	16,3	13,7
Keskiläpimitta, cm	19,4 (14,5*)	19,3 (12,5*)

* Aritmeettinen keskiläpimitta



Kuva 12. Koeleimikoiden puuston pohjapinta-alat relaskoopikoealoilla ennen hakkuuta.

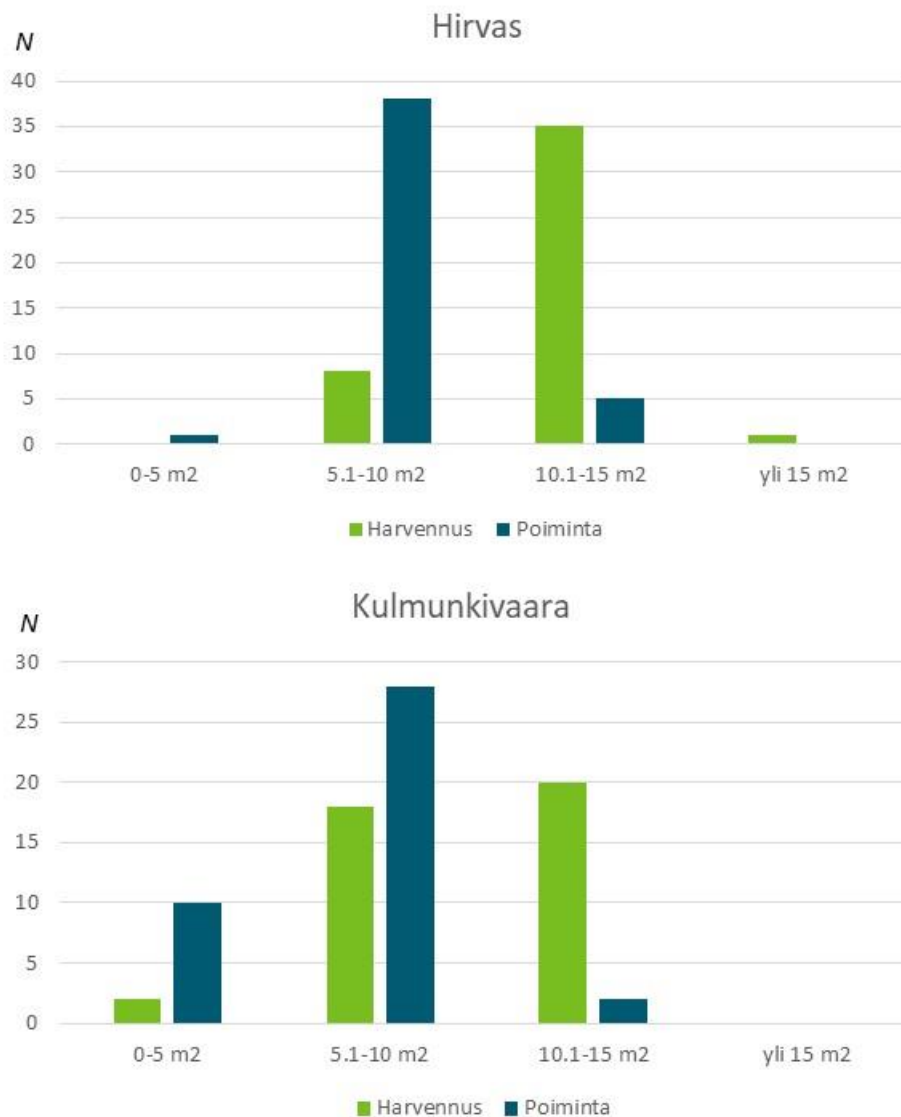
Puuston määrä hakkuun jälkeen poimintahakkuussa oli tavoitepohjapinta-alan mukainen, 7,9 m²/ha Hirvaalla ja 7,1 m²/ha Kulmunkivaaralla. Harvennushakkuissa puuston määrä sen sijaan jäi molemmilla kohteilla hieman alle harvennussuosituksen mukaisen pohjapinta-alan, ollen Hirvaalla 12,2 m²/ha ja Kulmunkivaaralla 10,3 m²/ha. Hirvaalla hakkuun jälkeinen puuston tiheyden vaihtelu molemmilla hakkuutavoilla oli pientä, ja valtaosalla inventointikoealoista puuston pohjapinta-ala oli tavoitteen mukainen (Kuva 13). Sen sijaan Kulmunkivaaralla puusto jäi tavoitetta harvemmaksi useilla koealoilla molemmilla hakkuutavoilla (Kuva 13).

Hirvaalla hakkuut olivat voimakkaita, suhteellisen hakkuupoistuman ollessa 47,7 % harvennuksessa ja 63,6 % poimintahakkuussa (Taulukko 3). Kulmunkivaaralla poistettiin puustosta 29,2 % harvennushakkuissa ja 43,2 % poimintahakkuissa (Taulukko 3).

Taulukko 3. Puustotunnukset hakkuun jälkeen poiminta- ja harvennushakkuissa.

	Hirvas		Kulmunkivaara	
	Harvennus	Poiminta	Harvennus	Poiminta
Runkoluku, N/ha ⁻¹	655	409	560	615
Pohjapinta-ala, m ² /ha	12,2	7,9	10,3	7,1
Keskipituus, m	16,2	16,5	14,1	12,8
Keskiläpimitta, cm	19,4 (13,6*)	19,7 (14,7*)	19,9 (12,8*)	17,2 (10,3*)
Poistuma, %	47,7	63,6	29,2	43,2

* Aritmeettinen keskiläpimitta



Kuva 13. Puuston pohjapinta-alajakauma inventointikoealoilla hakkuun jälkeen harvennus- ja poimintahakkuussa

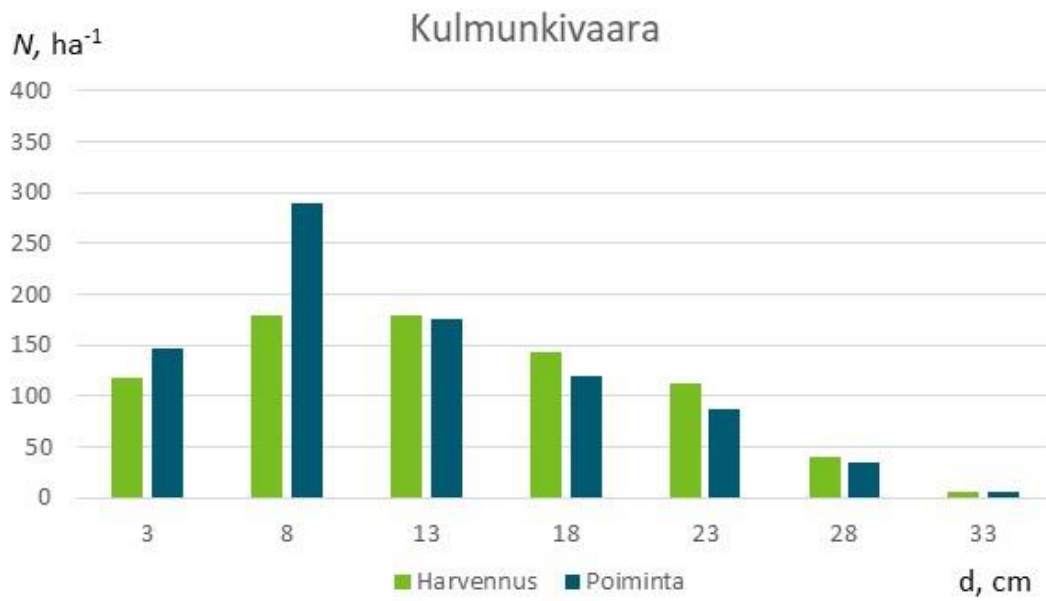
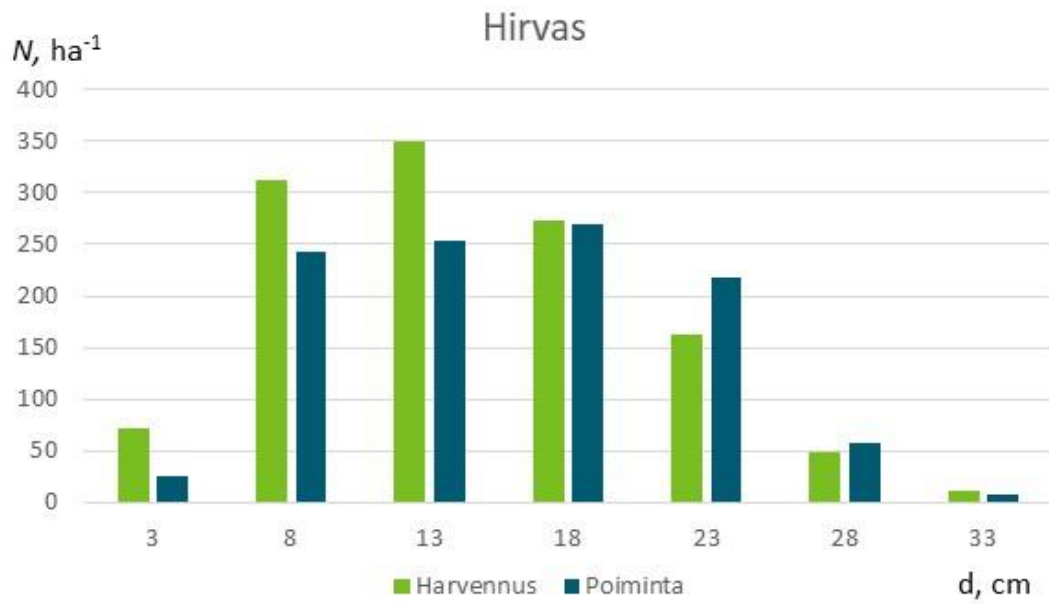
Hakkuutavan vaikutus puuston rakenteeseen vaihteli leimikoiden välillä. Puuston pohjapinta-alalla painotettu keskiläpimitta ennen harvennusta molemmissa leimikoissa oli noin 19 cm (Taulukko 2). Hakkuun jälkeen puuston keskiläpimitta pysyi lähes ennallaan lukuun ottamatta Kulmunkivaara, jossa keskiläpimitta tippui poimintahakkuissa 17,2 cm:iin (Taulukko 3). Hirvaalla hakkuutavan vaikutus puuston keskipituuteen oli molemmilla hakkuutavoilla vähäinen (Taulukot 2 ja 3). Sen sijaan Kulmunkivaaralla harvennuksen jälkeinen keskipituus oli hieman korkeampi kuin ennen hakkuuta, ja poimintahakkuissa keskipituuden muutos oli päinvastainen (Taulukot 2 ja 3).

Puuston eri-ikäisrakenteisuuden kuvaamisessa voidaan käyttää puuston aritmeettisen ja pohjapinta-alalla painotetun keskiläpimitan suhdetta (D_{suhde}). Pienet arvot viittaavat puuston eri-ikäisrakenteisuuteen ja lähellä ykköstä olevat arvot tasaikäisranteiseen metsään. Ennen hakkuuta suhde oli Hirvaalla 0,75 ja Kulmunkivaaralla 0,65. Keskiläpimittojen suhde oli Hirvaalla harvennuksen jälkeen 0,70 ja poimintahakkuun jälkeen 0,75. Vastaavat luvut olivat Kulmunkivaaralla harvennuksessa 0,64 ja poimintahakkuussa 0,60. Näiden lukujen perusteella

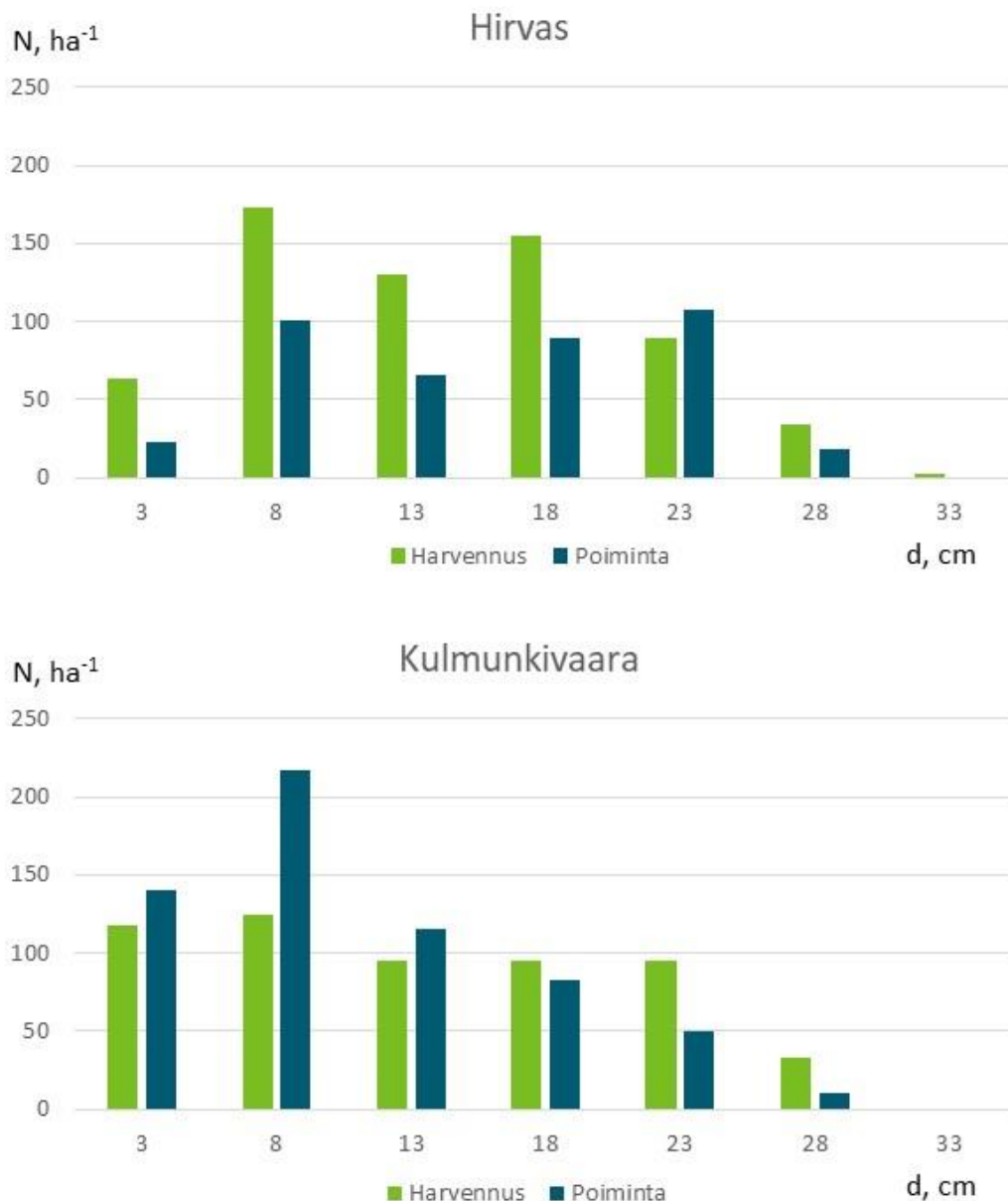
harvennuksissa pystyttiin säilyttämään tasaikäisen puuston rakenne. Poimintahakkuissa puuston rakenteen muutos kohti eri-ikäisrakenteisuutta onnistuttiin toteuttamaan paremmin Kulmunkivaaralla.

Tasaikäisessä metsässä puiden läpimittajakauma muistuttaa normaalijakaumaa, kun taas poimintahakkuissa tavoitteena saada rakenne, jossa puiden lukumäärä pienenee läpimitan kasvaessa. Ennen hakkuuta puuston läpimittajakauma Hirvaalla noudatti tasaikäisen metsikön puuston rakennetta, joskin harvennushakkuulohkolla pienten puiden (läpimitta <15 cm) määrä oli suurempi kuin poimintahakkuulohkolla (Kuva 14). Kulmunkivaaralla puustossa oli enemmän eri-ikäisrakenteisuutta, mikä näkyi vasemmalle vinona läpimittajakaumana (Kuva 14). Poimintahakkuumetsikölle ominaista oikealle laskevaa läpimittajakaumaa (Surakka & Sirén 2007) Kulmunkivaaralla ei kuitenkaan ollut, sillä puiden määrä pienimmässä läpimittaluokassa (läpimitta <5 cm) ei ollut riittävä. Harvennus- ja poimintahakkuulohkolla puiden kokoja-kaumat olivat lähes samanlaiset lukuun ottamatta läpimitaltaan alle 10 cm:n puita, joiden määrä oli suurempi poimintahakkuulohkolla.

Hakkuiden vaikutus puuston pitäisi näkyä selvemmin poimintahakkuussa, jossa tavoitteena oli muuttaa puustoa eri-ikäisrakenteisempaan suuntaan. Hirvaalla puuston rakenne ennen hakkuuta oli varsin tasaikäisrakenteinen, ja vaikka poimintahakkuussa poistuma painottui suurempiin läpimittaluokkiin, tavoiteltua oikealla laskevaa läpimittajakaumaa ei saavutettu (Kuva 15). Hirvaalla harvennushakkuussa jäävän puuston läpimittajakauma oli odotusten mukainen lukuun ottamatta pienempiä puita (läpimitta <10 cm), joiden suhteellinen osuus (37 %) oli jopa suurempi kuin poimintahakkuun jälkeen (21 %). Kulmunkivaaralla harvennushakkuu tuotti läpimittajakauman, jossa puiden määrän vaihtelu luokkien välillä oli pienempää kuin ennen hakkuuta (Kuva 15). Poimintahakkuussa puuston eri-ikäisrakenteisuus säilyi, ja muutos läpimittajakaumassa oli vähäinen – pienten puiden osuus kuitenkin hieman kasvoi ja suurten puiden laski.



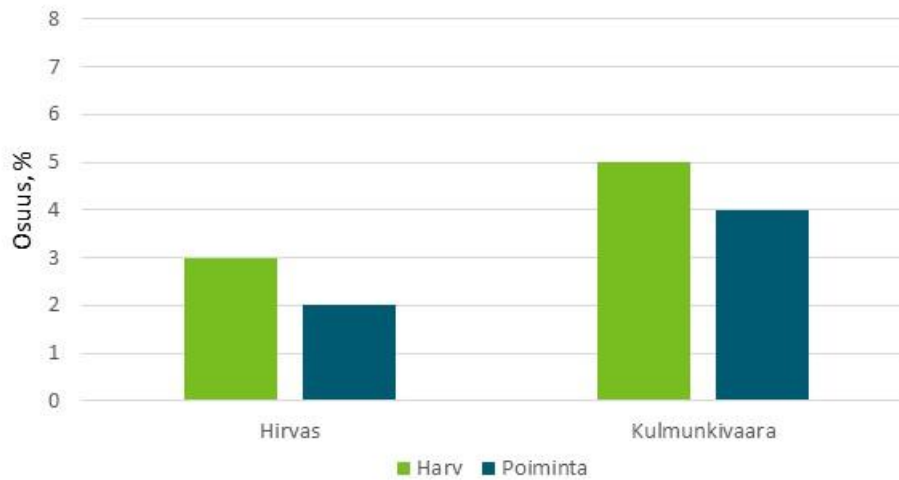
Kuva 14. Puuston läpimittajakauma ennen harvennus- ja poimintahakkuuta.



Kuva 15. Jäävän puuston läpimittajakauma harvennus- ja poimintahakkuun jälkeen.

3.3.2. Korjuujälki

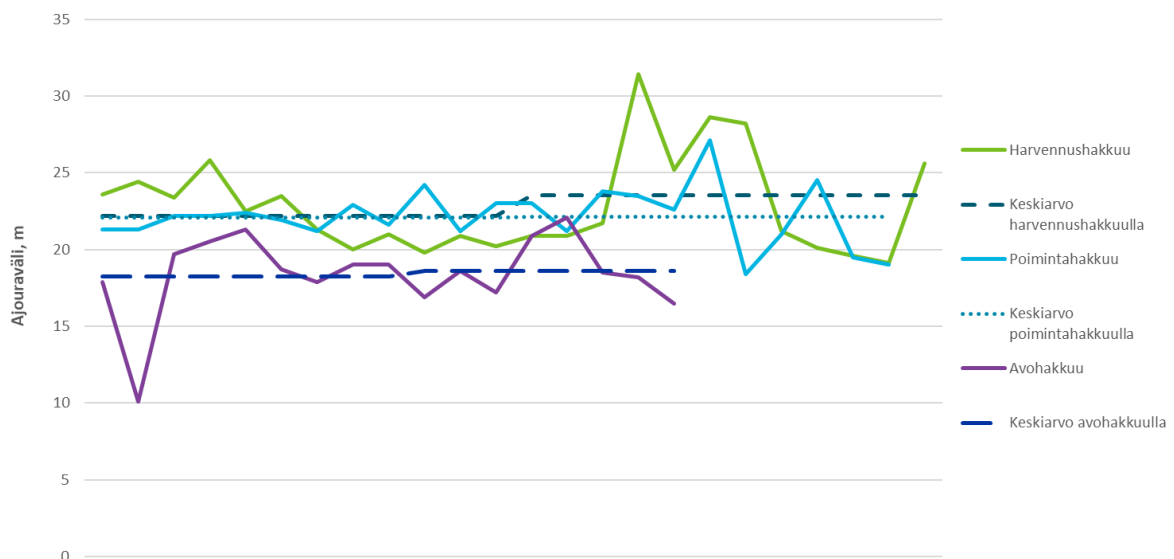
Hakkuun aiheuttamat korjuuvauriot jäävään puustoon olivat vähäisiä, 2–5 % riippuen leimikosta ja hakkuutavasta (Kuva 16). Korjuuvaurioiden määrä kesäleimikossa (Hirvas) oli molemmilla hakkuutavoilla hieman alhaisempi kuin talvileimikossa (Kulmunkivaara). Hakkuutapojen väliset erot olivat myös vähäiset. Harvennuskoealoilla vaurioituneita oli 3 % Hirvaalla ja 5 % Kulmunkivaaralla. Poimintahakkuu koealoilla vioittuneiden puiden määrä oli prosenttiyksikön verran alhaisempia molemmissa leimikoissa. Valtaosa korjuuvaurioista oli rungon kuorivaurioita. Korjuuvaurioiden synty oli varsin satunnaista, ja mitään riippuvuutta puuston tiheyteen tai hakkuupoistuman määrään inventointikoealalla ei löytynyt.



Kuva 16. Korjuuvaurioiden määrä (%) jäävässä puustossa.

3.3.3. Ajouraväli ja -leveys

Keskimääräinen ajouraväli kesä- ja talvikorjuun harvennishakkuu työmailla oli 22,2 ja 23,5 metriä kun mittaushavainnot vaihtelivat välillä 19,1–31,4 metriä (Kuva 17). Poimintahakkuu työmailla keskimääräinen ajouraväli oli puolestaan 22,1 metriä sekä kesä- että talvikorjuun työmailla, kun mittaushavainnot vaihtelivat välillä 18,4–27,1 metriä. Avohakkuulla työmaakoh- tainen keskiarvo oli 18,2 ja 18,6 metriä kun mittaushavainnot vaihtelivat välillä 10,1–22,1 met- riä (Kuva 17). Mittausten perusteella voi todeta, että sekä harvennishakkuu että poimintahak- kuu työmailla rinnakkaisten ajourien välinen etäisyys oli korjuusuositusten mukainen eli vä- hintään 19 metriä (Tarkastusohje 2022). Harvennus- ja poimintahakkuu koealoilla sekä toteu- tunut että metsänhoitosuosituksen mukainen runkoluku jäi pääsääntöisesti alle 600 kpl/ha:lla, minkä vuoksi toteutuneita uraleveyksiä ei raportoida (Tarkastusohje 2022).



Kuva 17. Ajouraväli hakkuutavoittain kesä- ja talvikorjuun työmailla.

3.4. Hakkuutyön ajanmenekki ja tuottavuus

3.4.1. Työpistesiiirron ajanmenekkimallit

Hakkuutyön mallinnuksessa työpistesiiirtymisen ($T_{\text{Työpistesiiirto}}$) ajanmenekkiä selitettiin hakkuupoistuman tiheydellä, eli poistettavien puiden lukumäärällä hehtaarilta. Poistuman tiheyden kasvaessa puukohtainen työpistesiiirtymisen ajanmenekki pieneni, kun samasta työpisteestä voitiin käsitellä useampia runkoja (Kuva 18). Avohakkuulla työpistesiiirron puukohtainen ajanmenekki oli vertailtavista hakkuutavoista pienin. Poimintahakkuisiin verrattuna työpistesiiirron puukohtainen ajanmenekki oli 0,5–1,1 sekuntia pienempi ja vastaavasti harvennushakkuisiin verrattuna puukohtainen ajanmenekki oli 0,9–1,5 sekuntia pienempi. Poimintahakkuun ja harvennushakkuun työpistesiiirron ajanmenekki kuvaajat leikkasivat, kun hakkuupoistuman tiheys oli 450 runkoa hehtaarilta. Tuota suuremmilla tiheyksillä harvennushakkuun puukohtainen työpistesiiirron ajanmenekki oli poimintahakkuiden työpistesiiirron ajanmenekkiä 0,2–1,0 sekuntia suurempi. F- ja t-testien p-arvojen perusteella työpistesiiirron ajanmenekkimallit olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($p < 0,001$). Mallien selitysaste (r^2) vaihteli välillä 0,445–0,921. Mitä suurempi selitysaste on, sitä paremmin malli pystyy ennustamaan selitettävän muuttujan vaihtelua.

Harvennushakkuu:

$$T_{\text{Työpistesiiirto H}} = 2,795 + 771,252 * (1/x_1)$$

, jossa

$T_{\text{Työpistesiiirto H}} =$ puukohtainen työpistesiiirron ajanmenekki harvennuksella, s

$x_1 =$ hakkuupoistuman tiheys harvennuksella, puita/ha

Mallin selitysaste, $r^2 = 0,445$

Poimintahakkuu:

$$T_{\text{Työpistesiiirto P}} = 1,232 + 1458,304 * (1/x_2)$$

, jossa

$T_{\text{Työpistesiiirto P}} =$ puukohtainen työpistesiiirron ajanmenekki poimintahakkuulla, s

$x_2 =$ hakkuupoistuman tiheys poimintahakkuulla, puita/ha

Mallin selitysaste, $r^2 = 0,921$

Avohakkuu:

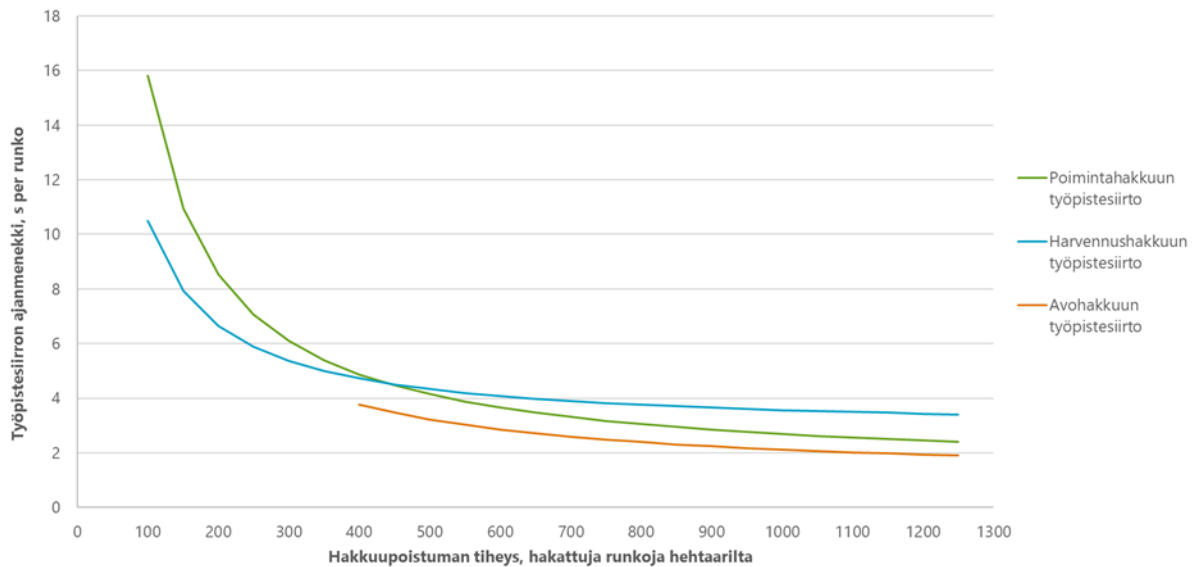
$$T_{\text{Työpistesiiirto A}} = 1,012 + 1104,754 * (1/x_3)$$

, jossa

$T_{\text{Työpistesiiirto A}} =$ puukohtainen työpistesiiirron ajanmenekki avohakkuulla, s

$x_3 =$ hakkuupoistuman tiheys avohakkuulla, puita/ha

Mallin selitysaste, $r^2 = 0,519$



Kuva 18. Hakkuukoneen työpistesirron ajanmenekki eri hakkuutavoilla hakkuupoistuman runkotiheyden mukaan.

3.4.2. Hakkuun ajanmenekkimallit

Hakkuun ajanmenekkimallit laadittiin harvennushakkuulle, paimintahakkuulle ja avohakkuulle. Em. hakkuutavoille laadittiin puulajista riippumattomat ns. yleismallit (Kuvat 19, 20, 21 ja 22) sekä puulajikohtaiset ajanmenekkimallit (Kuvat 23, 24 ja 25). Malleissa runkokohtainen hakkuun ajanmenekki laskettiin puun rungon käyttöosan tilavuuden (dm^3) perusteella. Mallien selitysaste (r^2) vaihteli välillä 0,108–0,593. F- ja t-testien p-arvojen perusteella hakkuun ajanmenekkimallit olivat tilastollisesti erittäin merkitseviä ($p < 0,001$) yleismallien sekä männyn ja kuusen osalta. Koivun harvennushakkuun ja avohakkuun osalta ajanmenekkimallit olivat tilastollisesti joko merkitseviä ($p < 0,01$) tai erittäin merkitseviä ($p < 0,001$). Koivun paimintahakkuun ajanmenekkimalli ei ollut tilastollisesti merkitsevä, minkä vuoksi malli hylättiin, etkä sitä sen vuoksi esitetä tuloksissa (Kuva 25).

Puulajista riippumattomia yleismalleja laadittaessa rungon käyttöosan tilavuus vaihteli harvennushakkuun aineistossa välillä 0,009–0,810 m^3 (Kuva 19), paimintahakkuun aineistossa välillä 0,010–0,835 m^3 (Kuva 20) ja avohakkuun aineistossa välillä 0,009–0,892 m^3 (Kuva 21). Puulajikohtaisten ajanmenekkimallien aineisto vaihteli männyn rungon käyttöosan osalta välillä 0,009–0,892 m^3 (Kuva 23), kuusella välillä 0,013–0,458 m^3 (Kuva 24) ja koivulla välillä 0,012–0,309 m^3 (Kuva 25).

Harvennushakkuun ajanmenekki:

$$T_{\text{Hakkuu H}} = 14,134 + 33,466 \cdot x_{1k}$$

, jossa

$T_{\text{Hakkuu H}}$ = puukohtainen hakkuun ajanmenekki harvennuksella, s

x_{1k} = rungon käyttöosan tilavuus harvennuksella, m^3

Mallin selitysaste, $r^2 = 0,373$

Poimintahakuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu P} = 13,98 + 35,72 \cdot x_{2k}$$

, jossa

$T_{Hakkuu P}$ = puukohtainen hakkuun ajanmenekki poimintahakuulla, s

x_{2k} = rungon käyttöosan tilavuus poimintahakuulla, m³

Mallin selitysaste, $r^2 = 0,400$

Avohakuun ajanmenekki:

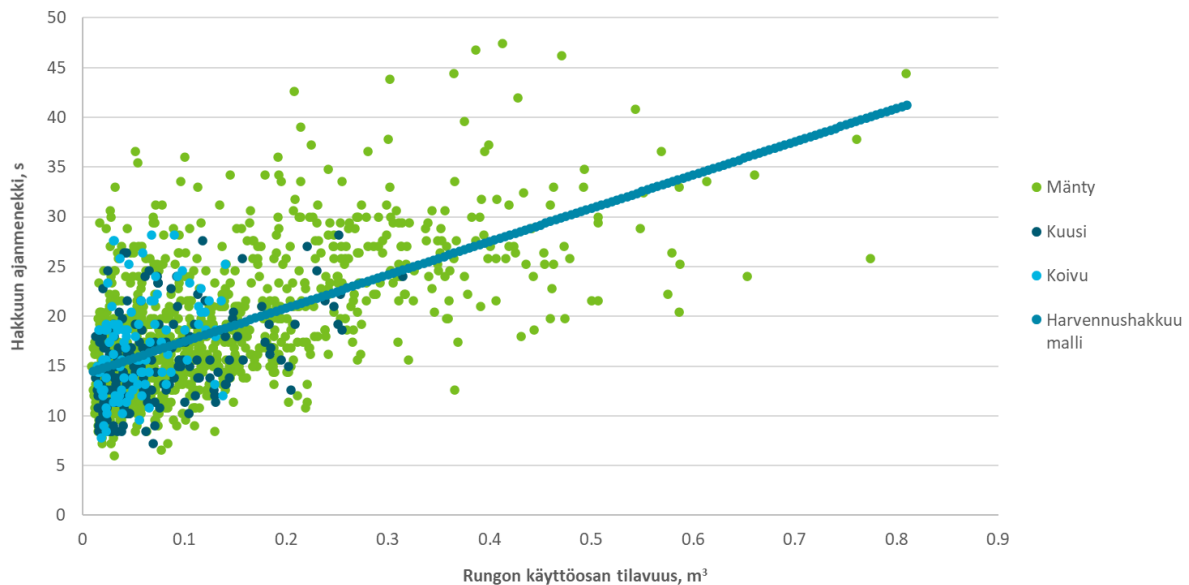
$$T_{Hakkuu A} = 12,085 + 42,722 \cdot x_{3k} - 13,13 \cdot x_{3k}^2$$

, jossa

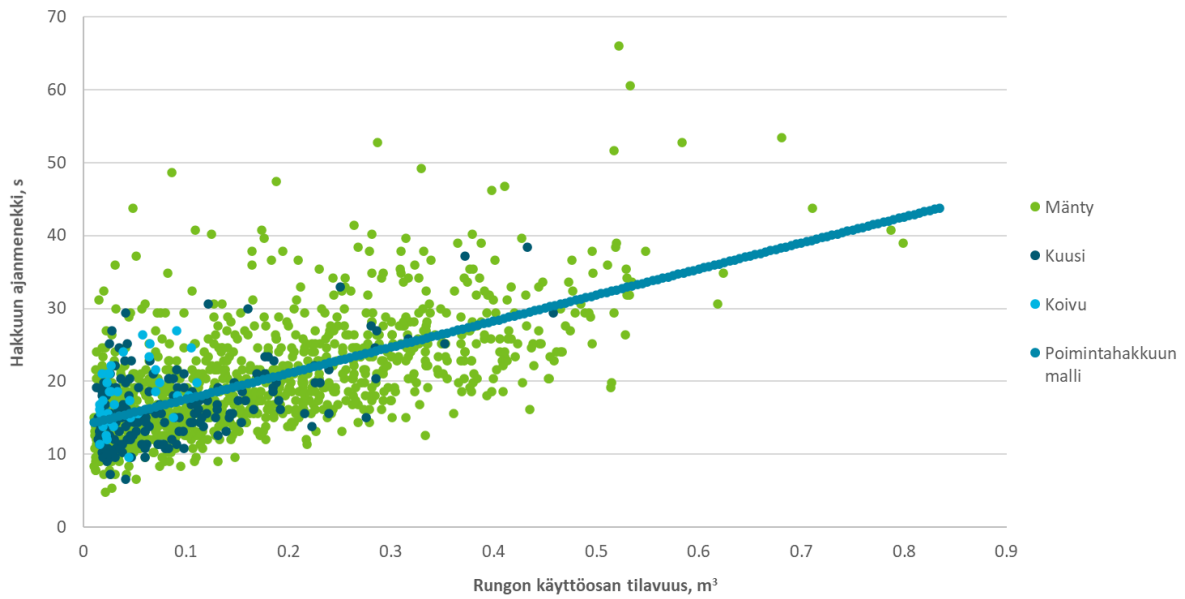
$T_{Hakkuu A}$ = puukohtainen hakkuun ajanmenekki avohakuulla, s

x_{3k} = rungon käyttöosan tilavuus avohakuulla, m³

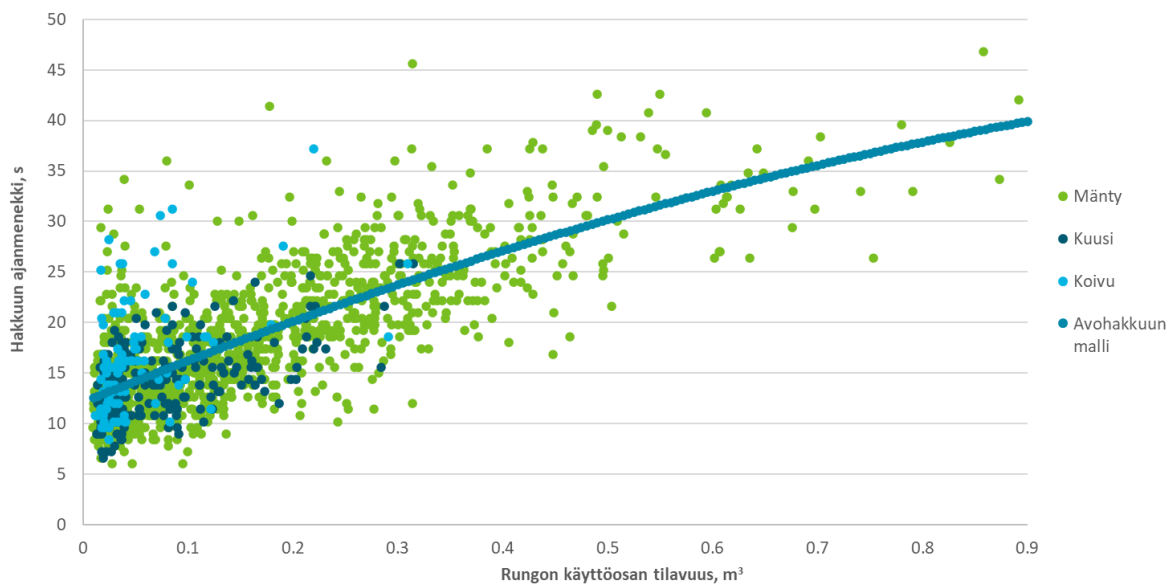
Mallin selitysaste, $r^2 = 0,565$



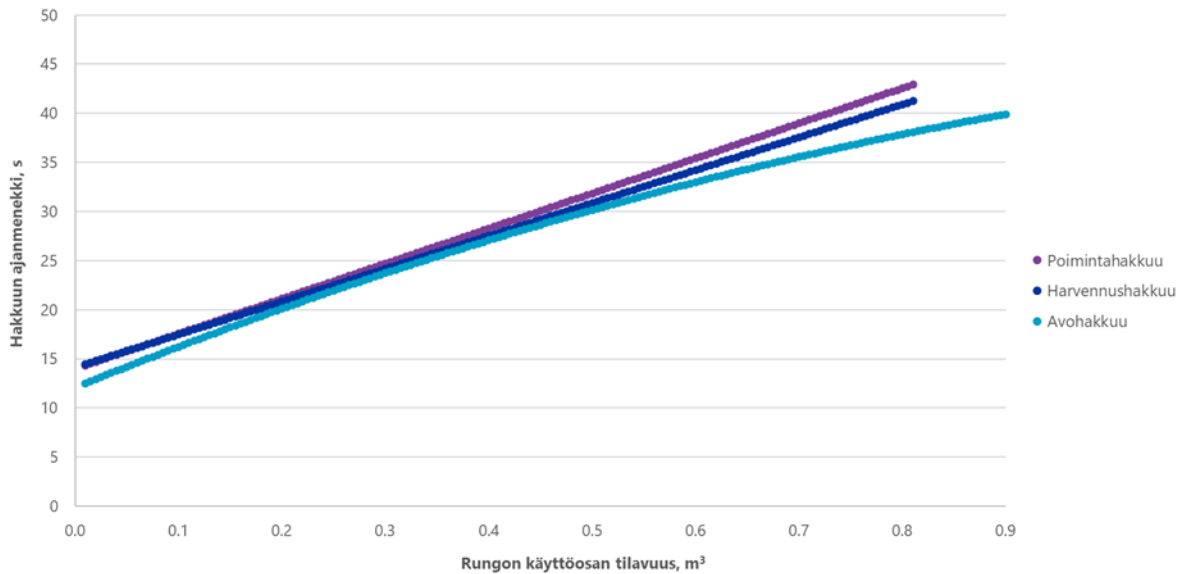
Kuva 19. Harvennushakkuun runkokohtaiset ajanmenekkihavainnot ja aikatutkimusaineiston pohjalta laadittu ajanmenekkimalli rungon käyttöosan tilavuuden mukaan.



Kuva 20. Paimintahakkuun runkokohtaiset ajanmenekkihavainnot ja aikatutkimusaineiston pohjalta laadittu ajanmenekkimalli rungon käyttöosan tilavuuden mukaan.



Kuva 21. Avohakkuun runkokohtaiset ajanmenekkihavainnot ja aikatutkimusaineiston pohjalta laadittu ajanmenekkimalli rungon käyttöosan tilavuuden mukaan.



Kuva 22. Poiminta-, harvennus- ja avohakkuun mallinnettu ajanmenekki rungon käyttöosan tilavuuden mukaan.

Männyn harvennushakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu Hpine} = 14,11 + 34,13 \cdot x_{1pine}$$

, jossa

$T_{Hakkuu Hpine}$ = männyn puukohtainen hakkuun ajanmenekki harvennuksella, s

x_{1pine} = mäntyrungon käyttöosan tilavuus harvennuksella, m³

Mallin selityssaste, $r^2 = 0,396$

Männyn poimintahakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu Ppine} = 13,886 + 36,209 \cdot x_{2pine}$$

, jossa

$T_{Hakkuu Ppine}$ = männyn puukohtainen hakkuun ajanmenekki poimintahakkuulla, s

x_{2pine} = mäntyrungon käyttöosan tilavuus poimintahakkuulla, m³

Mallin selityssaste, $r^2 = 0,407$

Männyn avohakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu\ Apine} = 11,77 + 45,059 \cdot x_{3p} - 16,063 \cdot x_{3pine}^2$$

, jossa

$T_{Hakkuu\ Apine}$ = männyn puukohtainen hakkuun ajanmenekki avohakkuulla, s

x_{3pine} = mäntyrunгон käyttöosan tilavuus avohakkuulla, m³

Mallin selityssaste, $r^2 = 0,593$

Kuusen harvennushakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu\ Hspruce} = 13,174 + 31,526 \cdot x_{1spruce}$$

, jossa

$T_{Hakkuu\ Hspruce}$ = kuusen puukohtainen hakkuun ajanmenekki harvennuksella, s

$x_{1spruce}$ = kuusirungon käyttöosan tilavuus harvennuksella, m³

Mallin selityssaste, $r^2 = 0,185$

Kuusen poimintahakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu\ Pspruce} = 13,398 + 36,12 \cdot x_{2spruce}$$

, jossa

$T_{Hakkuu\ Pspruce}$ = kuusen puukohtainen hakkuun ajanmenekki poimintahakkuulla, s

$x_{2spruce}$ = kuusirungon käyttöosan tilavuus poimintahakkuulla, m³

Mallin selityssaste, $r^2 = 0,332$

Kuusen avohakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu\ Aspruce} = 11,92 + 30,651 \cdot x_{3spruce}$$

, jossa

$T_{Hakkuu\ Aspruce}$ = kuusen puukohtainen hakkuun ajanmenekki avohakkuulla, s

$x_{3spruce}$ = kuusirungon käyttöosan tilavuus avohakkuulla, m³

Mallin selityssaste, $r^2 = 0,296$

Koivun harvennushakkuun ajanmenekki:

$$T_{Hakkuu\ Hb\ birch} = 14,568 + 45,071x_{1\ birch}$$

, jossa

$T_{Hakkuu\ Hb\ birch}$ = koivun puukohtainen hakkuun ajanmenekki harvennuksella, s

$x_{1\ birch}$ = koivurungon käyttöosan tilavuus harvennuksella, m³

Mallin selitysaste, $r^2 = 0,108$

Koivun avohakkuun ajanmenekki:

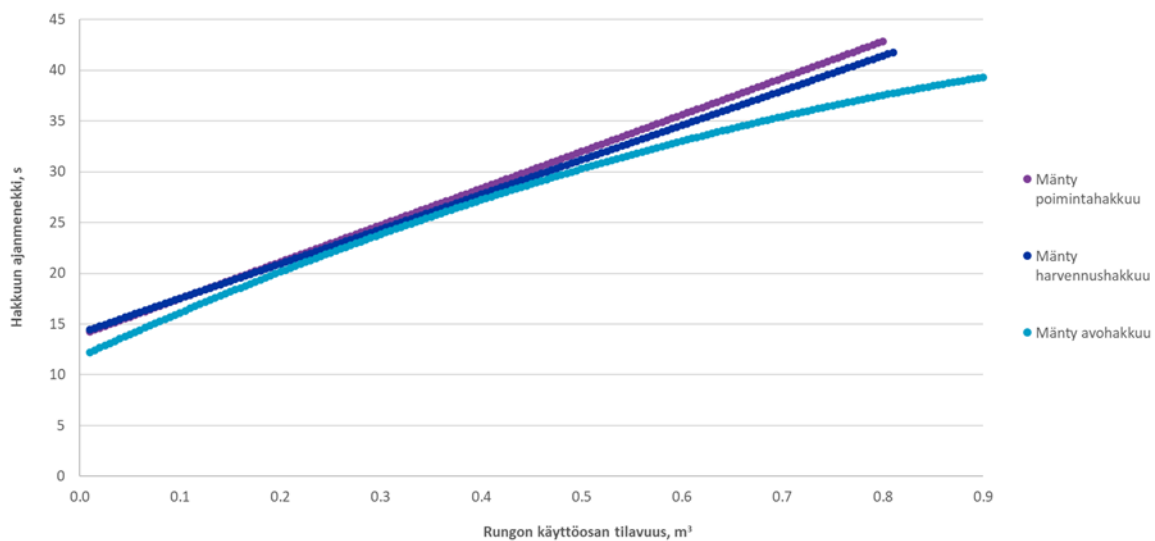
$$T_{Hakkuu\ Ab\ birch} = 14,05 + 47,858x_{3\ birch}$$

, jossa

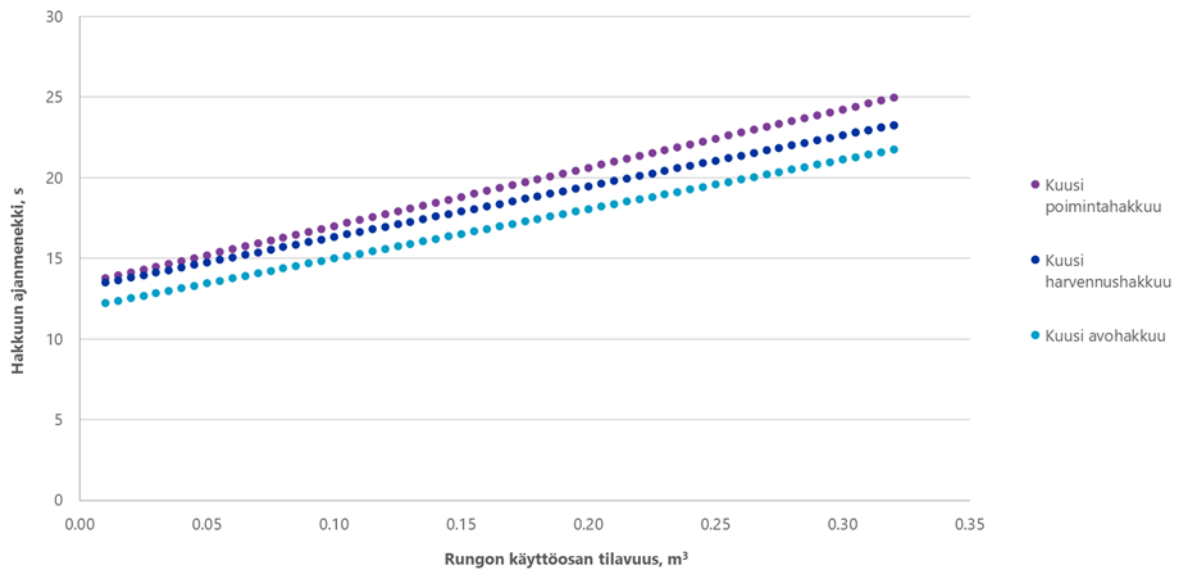
$T_{Hakkuu\ Ab\ birch}$ = koivun puukohtainen hakkuun ajanmenekki avohakkuulla, s

$x_{3\ birch}$ = koivurungon käyttöosan tilavuus avohakkuulla, m³

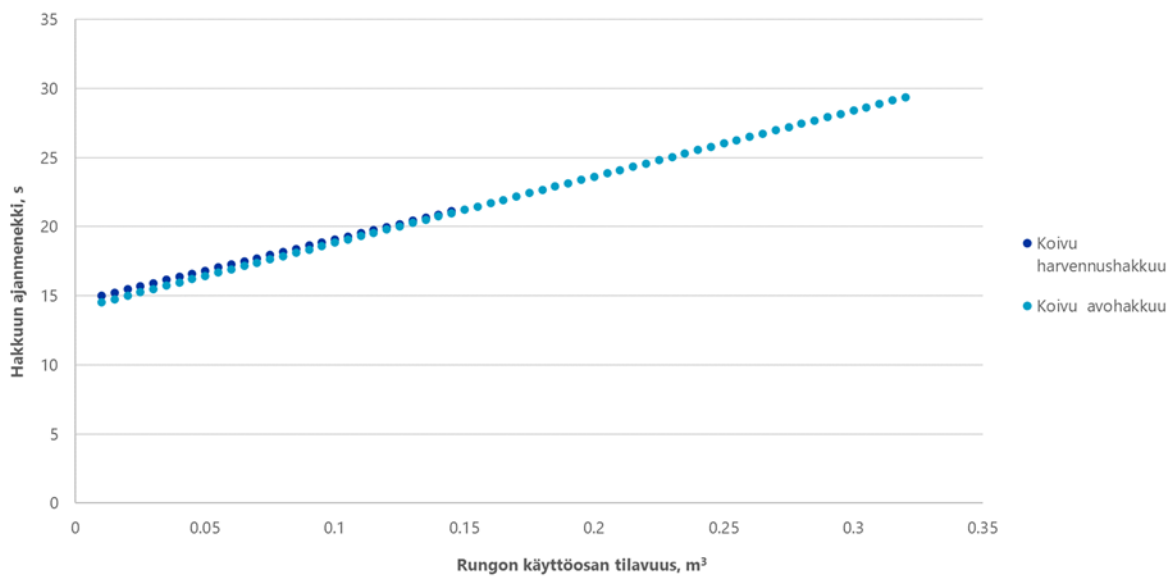
Mallin selitysaste, $r^2 = 0,204$



Kuva 23. Männyen poiminta-, harvennus- ja avohakkuun mallinnettu ajanmenekki rungon käyttöosan tilavuuden mukaan.



Kuva 24. Kuusen poiminta-, harvennus- ja avohakkuun mallinnettu ajanmenekki rungón käyttöosan tilavuuden mukaan.



Kuva 25. Koivun harvennus- ja avohakkuun mallinnettu ajanmenekki rungón käyttöosan tilavuuden mukaan.

3.4.3. Aputyövaiheiden ajanmenekki

Raivauksen (T_{Raivaus}) sekä puutavaran kasaukseen ja järjestelyihin (T_{Kasaus}) käytetty aika määritettiin runkokohtaisena keskiarvona tutkimuksessa mukana olleille hakkuutavoille. Raivauksen runkokohtainen ajanmenekki oli hakkuutavasta riippuen 0,8–1,4 sekuntia ja puutavaran kasauksen sekä järjestelyn ajanmenekki 0,2–0,3 sekuntia (Taulukko 4).

Taulukko 4. Hakkuutyöhön liittyneen raivauksen sekä puutavaran kasauksen ja järjestelyn runkokohtaiset ajanmenekit.

	Raivaus, s/runko	Kasaus ja järjestelyt, s/runko
Harvennushakkuu	1,4	0,2
Poimintahakkuu	0,9	0,3
Avohakkuu	0,8	0,2

3.4.4. Hakkuutapojen runkokohtainen ajanmenekki ja tuottavuus

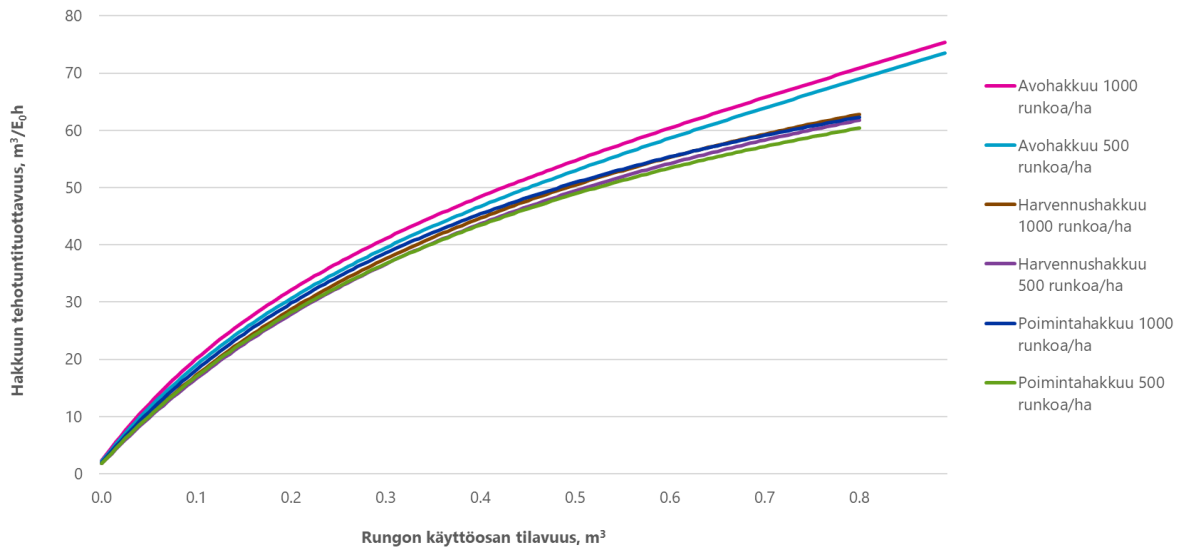
Eri hakkuutapojen runkokohtainen ajanmenekki (T_{Runko}) saatiin osatyövaiheiden summana: $T_{\text{Runko}} = T_{\text{Työpistesiiro}} + T_{\text{Hakkuu}} + T_{\text{Raivaus}} + T_{\text{Kasaus}}$. Hakkuukonetyön tuottavuus hakattuina runkoina tehotuntia kohden (kpl/E_0h) laskettiin jakamalla 3600 sekuntia (=1 tunti) runkokohtaisella tehoajanmenekillä (T_{Runko}). Runkoina ilmoitettu tehotuntituotos muutettiin puolestaan kiintokuutiometri kohtaiseksi tehotuntituotokseksi (m^3/E_0h) kertomalla tehotunnissa hakattujen runkojen kappalemäärä rungon käyttöosan tilavuudella (m^3).

Avohakkuulla oli vertailtavista hakkuutavoista ylin tehotuntituottavuus, kun hakkuupoistuman tiheys oli joko 500 tai 1000 runkoa hehtaarilta (Kuva 26). Verrattaessa poimintahakkuun tuottavuutta avohakkuun tuottavuuteen, oli avohakkuun tuottavuus rungon käyttöosan tilavuudesta riippuen 0,3–8,6 m^3/E_0h poimintahakkuuta suurempi. Vastaavasti verrattaessa harvennushakkuun tuottavuutta avohakkuun tuottavuuteen, oli avohakkuun tuottavuus rungon käyttöosan tilavuudesta riippuen 0,4–8,0 m^3/E_0h harvennushakkuuta suurempi (Kuva 26).

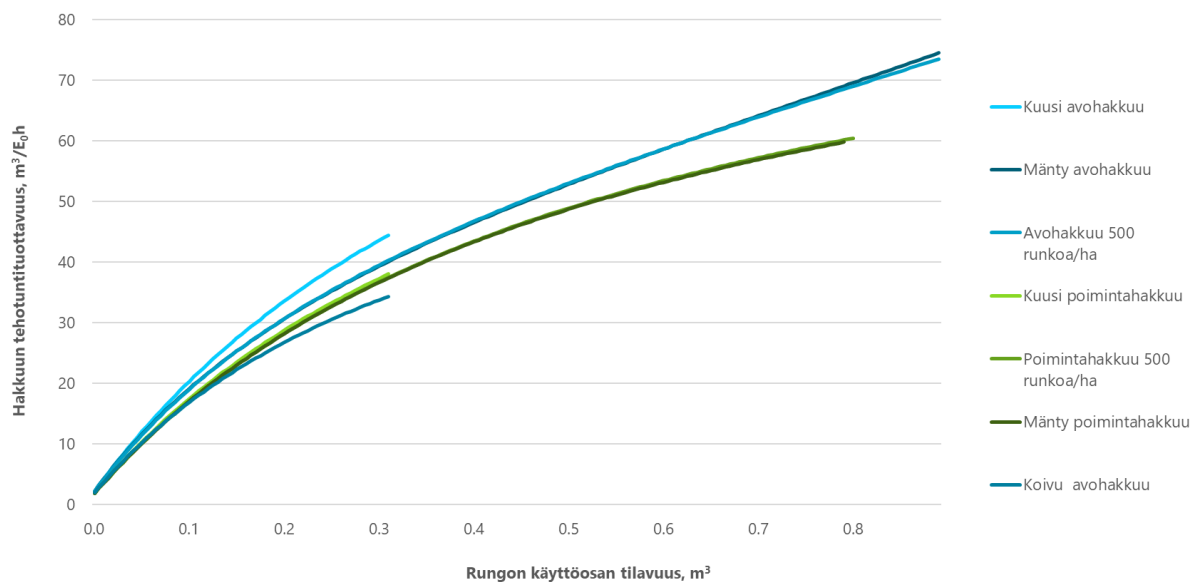
Poiminta- ja harvennushakkuun välisessä tuottavuusvertailussa poimintahakkuun ja harvennushakkuun tuottavuuskäyrät leikkasivat rungon tilavuudella 0,34 m^3 kun hakkuupoistuman tiheys oli 500 runkoa hehtaarilta ja rungon tilavuudella 0,64 m^3 kun hakkuupoistuman tiheys oli 1000 runkoa hehtaarilta (Kuva 26). Em. leikkauspisteitä suuremmilla rungoilla harvennushakkuun tuottavuus on suurempi kuin poimintahakkuun tuottavuus (Kuva 26). Jos raivaukseen ja kasaukseen käytettyä olosuhde riippuvaista ajanmenekkiä ei huomioida laskennassa, ovat vastaavat hakkuutapojen väliset leikkauspisteet kohdissa 0,15 m^3 ja 0,46 m^3 . Kuvan 26 perusteella yhteenvetona voi todeta, että poiminta- ja harvennushakkuun erot tehotuntituottavuudessa ovat hyvin pienet.

Kuvassa 27 on esitetty avo- ja poimintahakkuun tehotuntituottavuus puulajeittain rungon käyttöosan tilavuuden mukaan, kun hakkuupoistuman tiheys on 500 runkoa hehtaarilta. Tulosten mukaan koivulla on pienin hakkuutyön tehotuntituottavuus avohakkuussa ja vastaavasti kuusella korkein. Männyn hakkuun mallinnettu tehotuntituottavuus on puolestaan käytännössä sama kuin ns. puulajiriippumattomalla yleismallilla laskettu avo- ja poimintahakkuun tuottavuus (Kuva 27). Verrattaessa poiminta- ja harvennushakkuun puulajeittaista tehotuntituottavuutta rungon käyttöosan tilavuuden mukaan, voi todeta hakkuutapojen

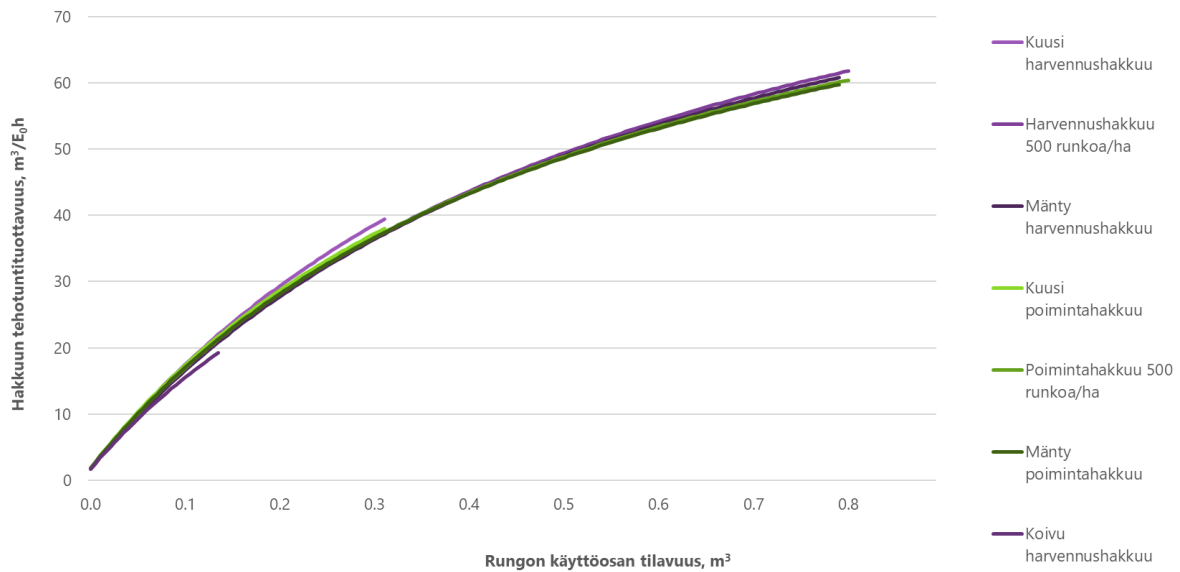
tehotuntituottavuuden olevan samaa tasoa puulajista riippumatta (Kuva 28). Avo- ja harvennushakkuun välisessä vertailussa (Kuva 29) saadut tulokset vastaavat avo- ja poimintahakkuun välisen tehotuntituottavuus vertailun tuloksia (Kuva 27) sekä koivun, kuusen että männyn osalta (Kuva 29). Havupuihin verrattuna koivun runko on mutkaisempi ja usein haaroittunut, mikä heijastuu alempana hakkuutyön tuottavuutena verrattuna mäntyyn tai kuuseen.



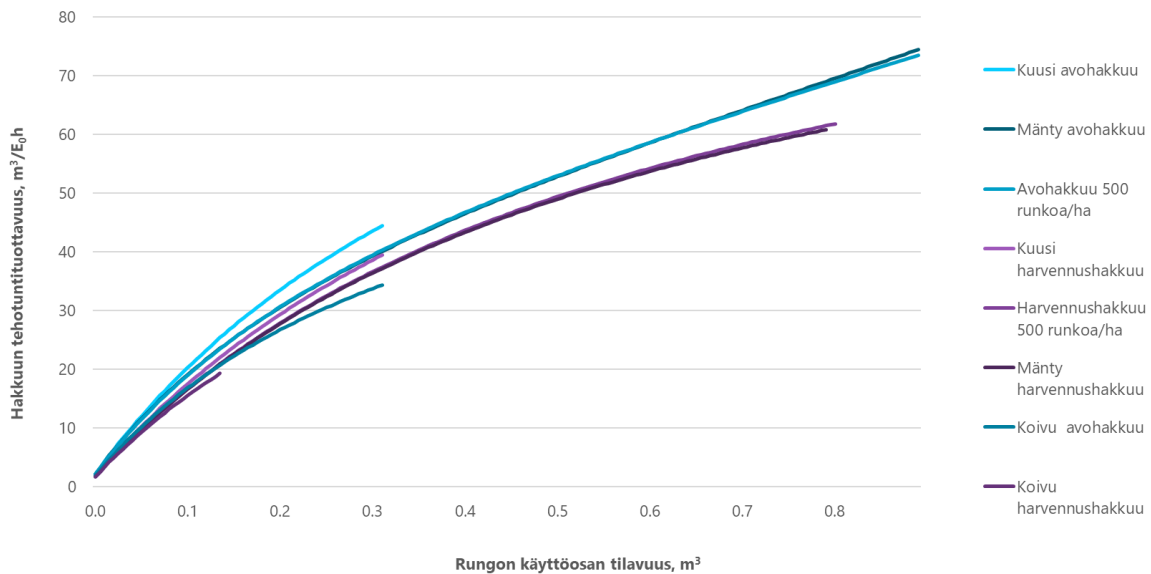
Kuva 26. Avo-, harvennus- ja poimintahakkuun mallinnettu tehotuntituottavuus rungon käyttöosan tilavuuden mukaan, kun hakkuupoistuman tiheys on 500 ja 1000 runkoa hehtaarilta.



Kuva 27. Avo- ja poimintahakkuun mallinnettu tehotuntituottavuus puulajeittain rungon käyttöosan tilavuuden mukaan. Hakkuupoistuma 500 runkoa hehtaarilta.



Kuva 28. Poiminta- ja harvennushakkuun mallinnettu tehotuntuottavuus puulajeittain rungon käyttöosan tilavuuden mukaan. Hakkuupoistuma 500 runkoa hehtaarilta.



Kuva 29. Avo- ja harvennushakkuun mallinnettu tehotuntuottavuus puulajeittain rungon käyttöosan tilavuuden mukaan. Hakkuupoistuma 500 runkoa hehtaarilta.

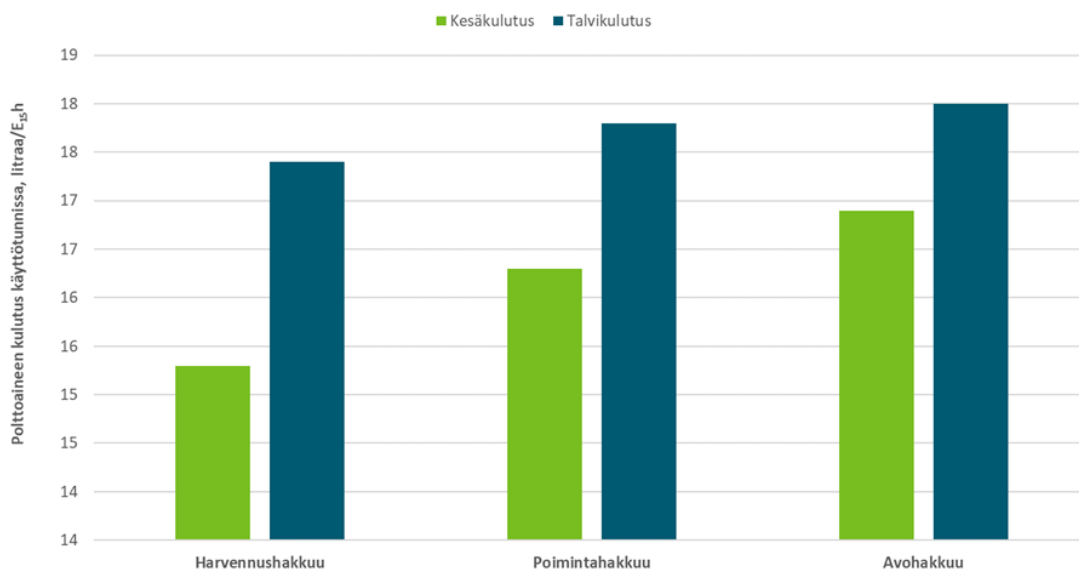
3.5. Puunkorjuun kustannukset

3.5.1. Polttoaineen kulutus

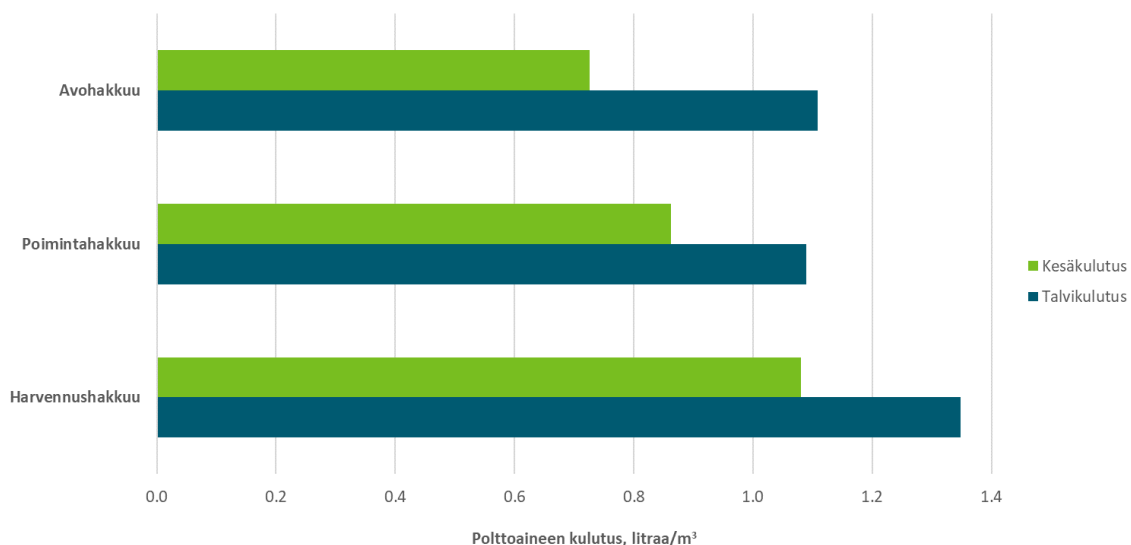
Hakkuukoneen polttoaineen kulutus käyttötuntia kohden oli 15,3–18,0 litraa hakkuutavasta ja vuodenajasta riippuen (Kuva 30). Eniten polttoainetta kului avohakkuulla (16,9–18,0 litraa) ja vähiten harvennushakkuulla (15,3–17,4 litraa). Kesäolosuhteissa polttoaineen käyttötuntikulutus oli 1,1–2,1 litraa pienempi kuin talviolosuhteissa.

Hakkuukoneen polttoaineen kulutus hakattua ainespuu kiintokuutiometriä kohden oli hakkuutavasta ja vuodenajasta riippuen 0,73–1,35 litraa per m³ (Kuva 31). Eniten polttoainetta hakattua ainespuu kiintokuutiometriä kohden kului harvennushakkuulla (1,08–1,35 litraa per m³) ja vähiten avohakkuulla (0,73–1,11 litraa per m³). Kesäolosuhteissa polttoainetta kului 0,23–0,38 litraa per m³ vähemmän kuin talviolosuhteissa.

Avohakkuulla polttoaineen kulutuksen eroa kesä- ja talvikorjuun työmaiden välillä selittää vuodenajan ohella se, että rungon käyttöosan keskitilavuus oli talvikorjuun työmaalla selvästi pienempi kuin kesäkorjuun työmaalla (Kuva 10), mikä alentaa hakkuukoneen tuottavuutta ja vastaavasti nostaa polttoaineen kulutusta hakattua ainespuu kiintokuutiometriä kohden. Poimintahakkuun ja harvennushakkuun työmailla em. vastaavaa eroa rungon käyttöosan keskitilavuudessa ja hakkuutyön tuottavuudessa ei ollut.



Kuva 30. Hakkuukoneen polttoaineen käyttötuntikulutus hakkuutavoittain kesä- ja talviolosuhteissa.

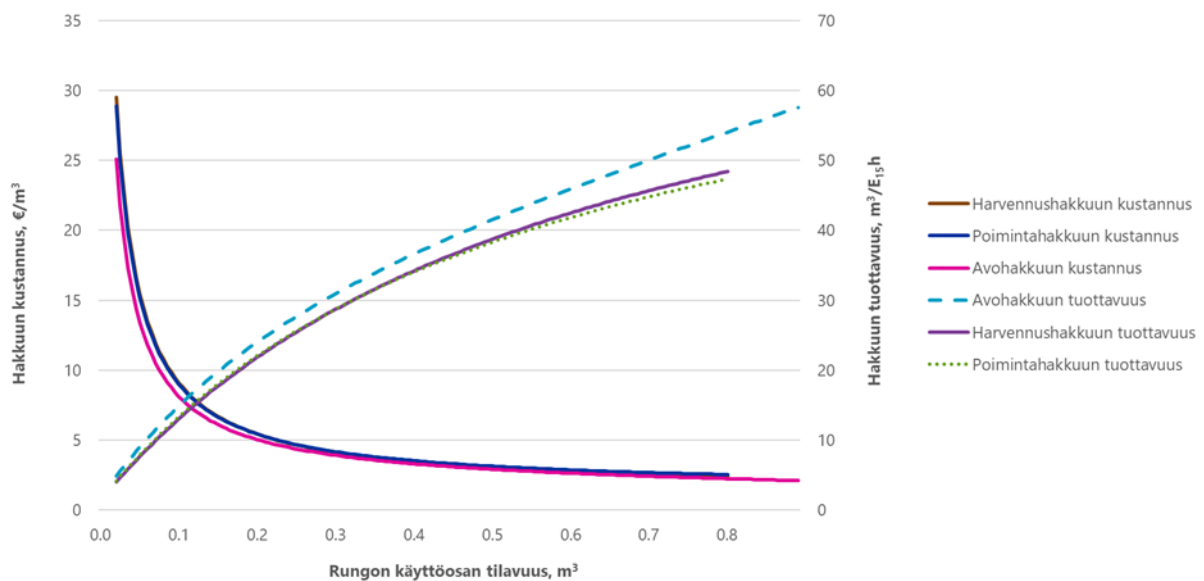


Kuva 31. Hakkuukoneen polttoaineen kulutus hakattua ainespuu kiintokuutiometriä (litraa/m³) kohden hakkuutavoittain kesä- ja talviolosuhteissa.

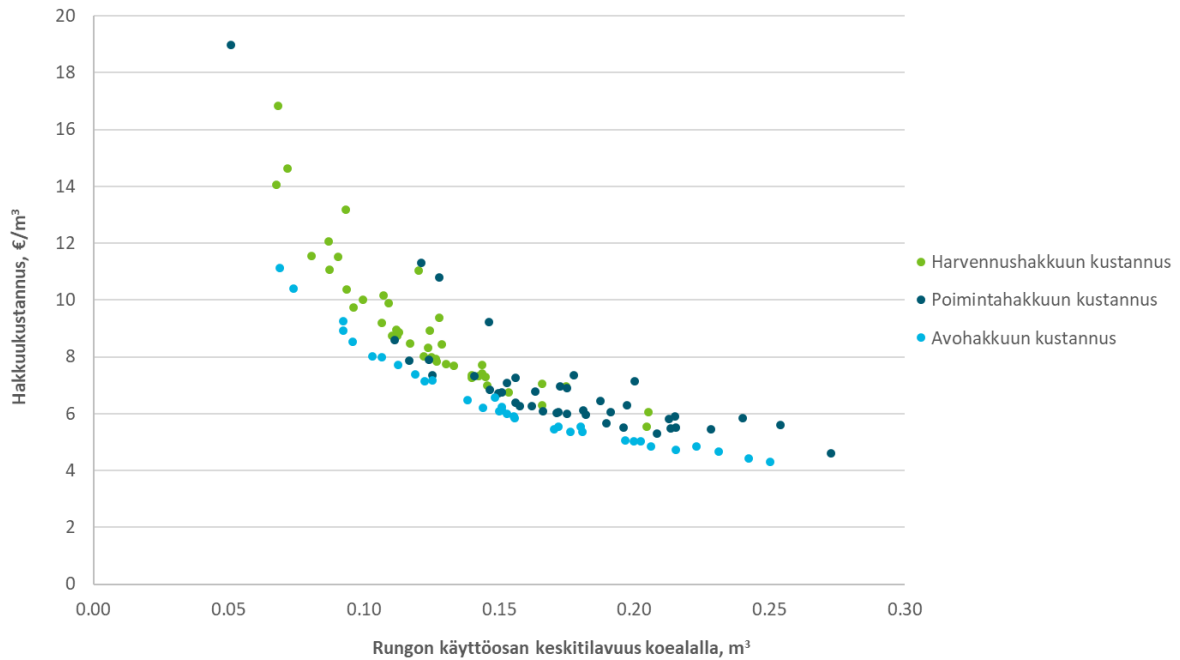
3.5.2. Hakkuun ja metsäkuljetuksen kustannukset

Hakkuukustannusvertailussa poiminta- ja harvennushakkuuden kustannuskäyrät leikkasivat, kun rungon käyttöosan tilavuus oli $0,205 \text{ m}^3$. Em. suuremmilla rungon käyttöosaan tilavuuksilla harvennushakkuun hakkuukustannukset olivat poimintahakkuuta $0,01\text{--}0,08 \text{ €/m}^3$ alemmat (Kuva 32). Tuottavuusperusteisessa vertailussa poimintahakkuun ja harvennushakkuun tuottavuuskäyrät leikkasivat rungon tilavuudella $0,335 \text{ m}^3$, kun hakkuupoistuma oli 500 runkoa hehtaarilta ja raivaukseen sekä kasaukseen käytetty hakkuutapakohtainen em. aputyöaikaajan ajamenekki oli huomioitu laskennassa. Jos em. vahvasti olosuhteista riippuvien aputyöaikaajan ajamenekkejä ei huomioida laskennassa siirtyy kustannus- ja tuottavuuskäyrien leikkauspisteet kohtiin, missä rungon käyttöosan tilavuus on $0,055 \text{ m}^3$ ja $0,155 \text{ m}^3$. Avohakkuulla hakkuun käyttötuntituottavuus oli rungon käyttöosan tilavuudesta riippuen $1,0\text{--}7,0 \text{ m}^3/\text{E}_{15}\text{h}$ suurempi ja vastaavasti hakkuukustannus $0,3\text{--}3,8 \text{ €/m}^3$ alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla (Kuva 32).

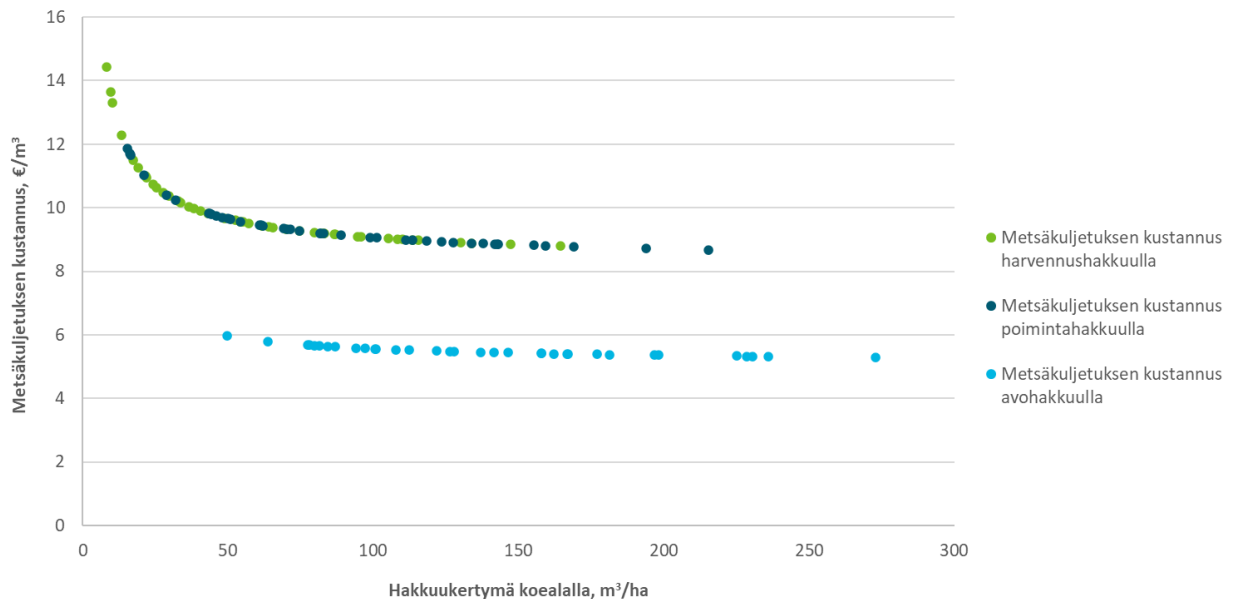
Kuvassa 33 on esitetty hakkuukustannukset aikatutkimuskoealoja vastaavissa korjuuolosuhteissa rungon käyttöosan keskitilavuuden (m^3) mukaan. Poimintahakkuissa poistettavien puiden valinta tehdään yläharvennusperiaatteella, eli poistettavat puut ovat pääsääntöisesti järeimpiä ja harvennusvoimakkuus suurempi kuin alaharvennusperiaatetta noudattavilla harvennushakkuilla, mikä ilmenee alemmina hakkuukustannuksina hakkuutapojen välisessä kustannusvertailussa koealatasolla (Kuva 33). Suuremmasta hakkuutyön tuottavuudesta johtuen avohakkuilla hakkuukustannus (€/m^3) on alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla, vaikka rungon käyttöosan keskitilavuus olisikin sama (Kuva 33).



Kuva 32. Hakkuun tuottavuus ($\text{m}^3/\text{E}_{15}\text{h}$) ja kustannus (€/m^3) rungon käyttöosan tilavuuden (m^3) mukaan eri hakkuutavoilla, kun hakkuupoistuma on 500 runkoa hehtaarilta.



Kuva 33. Hakkuun kustannus (€/m³) rungon käyttöosan koelakohtaisen keskitilavuuden (m³) mukaan eri hakkuutavoilla.

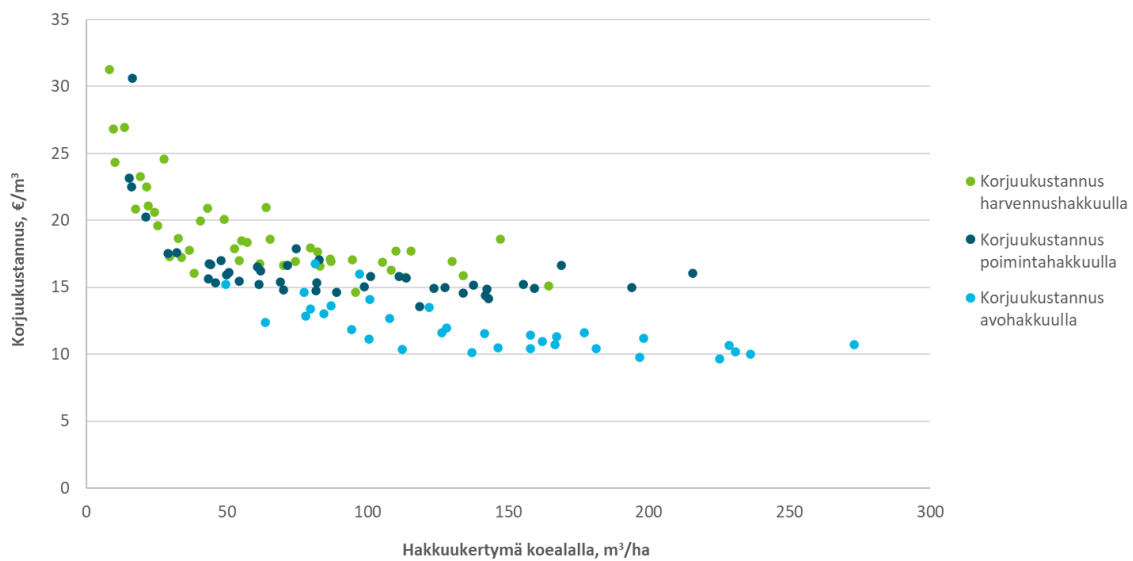


Kuva 34. Metsäkuljetuksen kustannus (€/m³) koelakohtaisen hakkuukertymän (m³/ha) mukaan eri hakkuutavoilla, kun metsäkuljetusmatka on 300 m.

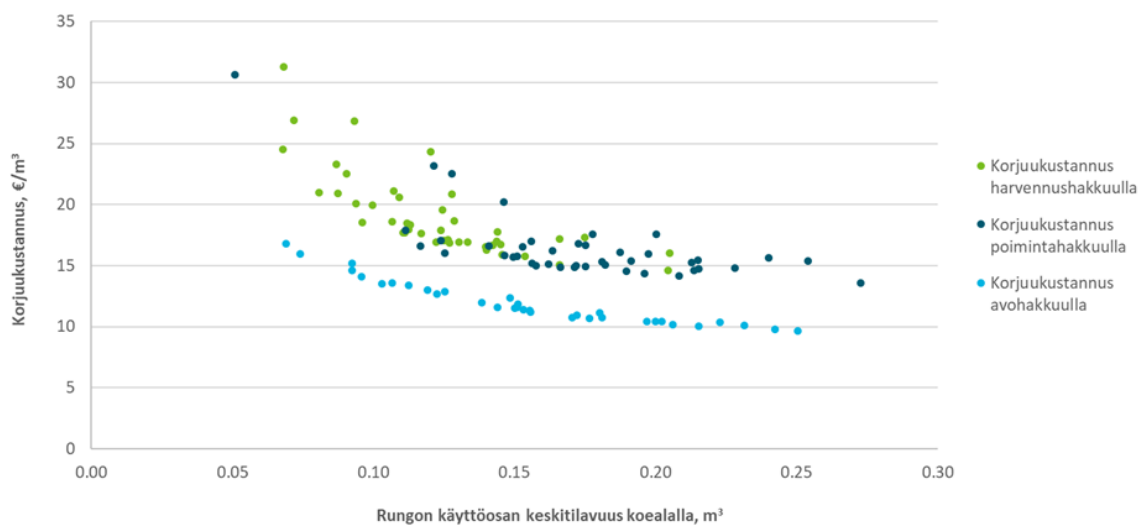
Kuvassa 34 on esitetty metsäkuljetuksen kustannukset koelakohtaisen hakkuukertymän mukaan eri hakkuutavoilla. Avohakkuilla metsäkuljetuksen kustannus oli noin 3,50 €/m³ alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla kun hakkuukertymä (m³/ha) oli samaa luokkaa kaikilla vertailtavilla hakkuutavoilla (Kuva 34). Avohakkuilla metsäkuljetuksen tuottavuutta paransi kuormatraktorin 3,0 m³ suurempi kuormakoko, kuin myös se, että puutavaran kuormauksessa ei tarvitse varoa jäävää puustoa toisin kuin harvennus- ja poimintahakkuilla. Kolmas tuottavuutta parantava tekijä on hakkuukertymä (m³/ha), mikä avohakkuilla on pääsääntöisesti suurempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla (Kuva 34). Hakkuukertymän kasvu tehostaa

puutavaran kuormasta työpisteellä sekä vähentää kuormausajon ajanmenekkiä, kun kuor-
matraktorin kuorma saadaan täyteen lyhyemmältä matkalta.

Kuvissa 35 ja 36 on esitetty puunkorjuun kokonaiskustannus (hakkuu ja metsäkuljetus) tien-
varsivarastolla koealakohtaisen hakkuukertymän (m^3/ha) ja rungon käyttöosan keskitilavuuden (m^3) mukaan eri hakkuutavoilla, kun metsäkuljetusmatka on 300 metriä. Kuvista käy hyvin
ilmi poimintahakkuun ja perinteisen harvennushakkuun puuvalinnan ja harvennusvoimakkuu-
den vaikutus hakkuukertymään sekä rungon käyttöosan keskitilavuuteen, mistä syystä poi-
mintahakkuun korjuukustannukset tienvarsivarastolla ovat alemmat kuin harvennushakkuilla.
Avohakkuilla sekä hakkuun että metsäkuljetuksen kustannukset ovat vertailtavista hakkuuta-
voista alimmat, mistä syystä puunkorjuun kustannukset tienvarsivarastolla ovat selvästi pie-
nemät kuin kasvatushakkuisiin luettavilla harvennus- ja poimintahakkuilla (Kuvat 35 ja 36).



Kuva 35. Puunkorjuun kustannus (hakkuu + metsäkuljetus, €/m³) koealakohtaisen hakkuuker-
tymän (m^3/ha) mukaan eri hakkuutavoilla, kun metsäkuljetusmatka on 300 m.



Kuva 36. Puunkorjuun kustannus (hakkuu + metsäkuljetus, €/m³) rungon käyttöosan koeala-
kohtaisen keskitilavuuden (m^3) mukaan eri hakkuutavoilla, kun metsäkuljetusmatka on 300 m.

4. Tulosten tarkastelu

4.1. Työntutkimus

Tässä tutkimuksessa hakkuutapakohtaista hakkuutyön ajanmenekkiä ja tuottavuutta mallinnettiin rungon käyttöosan tilavuuden ja hakkuupoistuman tiheyden perusteella. Rungon käyttöosan tilavuuden ja hakkuupoistuman tiheyden on useissa tutkimuksissa todettu olevan keskeisimmät hakkuutyön tuottavuutta selittävät tekijät (Kuitto ym. 1994, Nurminen ym. 2006, Jylhä ym. 2019, Laitila ym. 2020), mikä ilmeni selvästi myös tässä tutkimuksessa. Puuston ohella toinen keskeinen hakkuutyön ajanmenekkiin ja tuottavuuteen vaikuttava tekijä on kuljettaja, mikä vaikuttaa tulosten yleistettävyyteen, koska kuljettajien välillä on havaittu olevan merkittäviä eroja tuottavuudessa (Rajamäki ym. 1996, Purfürst & Erler 2011, Ovaskainen 2009, Malinen ym. 2018). Tähän tutkimukseen osallistunut kuljettaja oli kokenut, taitava ja vertailtaviin työtapoihin harjaantunut. Kariniemen (2006) tutkimuksen mukaan hakkuukoneenkuljettajalta vaadittavia lahjakkuusominaisuuksia ovat mm. visuaalinen ja tekninen lahjakkuus, koordinoitujen liikesuoritusten nopeus ja tarkkuus, kätevyys sekä reaktioiden nopeus ja tarkkuus. Tulosten mukaan rungon käyttöosan tilavuus ja hakkuukoneen kuljettaja selittävät yhdessä jopa 84 % hakkuutyön tuottavuuden kokonaisvaihtelusta (Purfürst & Erler 2011).

Muita hakkuutyön tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä ovat mm. käsiteltävä puulaji, katkottavien puutavaralajien määrä, maastoluokka, alikasvoksen määrä ja koneen kokoluokka (Kuitto ym. 1994, Rajamäki ym. 1996, Kärhä ym. 2006, Nurminen ym. 2006, Ovaskainen 2012, Eriksson & Lindroos 2014, Jylhä ym. 2019). Em. tekijöiden osalta tutkimustyömaiden korjuuolosuhteet olivat tavanomaiset ja korjuukalusto tarkoitukseen sopiva. Aiemmissä tutkimuksissa hakkuukoneen koolla on havaittu olevan vaikutusta työn tuottavuuteen etenkin avohakkuilla, jossa tehokkuudeltaan pienempien hakkuukoneiden tuottavuuserot tulevat selvemmin esiin suurempiin hakkuukoneisiin verrattuna (Eriksson & Lindroos 2014, Liski ym. 2020).

Hakkuutyön kuvaus onnistui hyvin hakkuukoneen ohjaamoon kiinnitetyllä videokameralla ja videokameran sijainnista johtuen työntutkijan näkymä työskentelyalueelle oli esteetön. Muistikortille taltioidun aineiston kuvanlaatu oli myös hyvä, mikä helpotti työvaiheiden havainnointia tietokoneen näytöltä aikatutkimuksissa. Koottu videoaineisto analysoitiin saman työntutkijan toimesta, joten koottu aikatutkimusaineisto oli yhdenmukainen ja vertailukelpoinen eri hakkuutapojen välillä (Nuutinen ym. 2008). Tutkimuskohteilla koealajärjestelyt onnistuttiin toteuttamaan hyvin, minkä ansioista hakkuupoistuman tiheyden ja rungon käyttöosan tilavuuden vaihtelu oli tarkoituksenmukainen. Puustoaineisto oli kattava ja mahdollisti kootun ajanmenekki aineiston pohjalta tehdyt hakkuutapojen väliset ajanmenekki- tuotos- ja korjuukustanusvertailut. Tutkimukseen osallistui ainoastaan yksi kuljettaja mutta vertailevan aikatutkimuksen periaatteen mukaan, tutkittaessa samankaltaisia työmenetelmiä samankaltaisissa olosuhteissa, saadaan eri työmenetelmien ja -olojen välille työntekijästä riippumaton tuotos- ja ajanmenekkisuhde (Uusitalo 2003). Lisäksi useamman kuljettajan mukaanotto tutkimukseen olisi vaatinut huomattavasti enemmän resursseja, mitä toteutukseen oli käytettävissä.

Aikatutkimuskoealat olivat varsin lyhyitä (25 metriä), mikä mahdollisti metsikön runkotiheyden vaihtelun huomioinnin tarkemmin, verrattuna siihen, että aikatutkimuskoealat olisivat olleet pidempiä. Lyhyiden koealojen käyttöä puolsi myös se, että aineiston jatkoanalysoinnissa lyhyet hakkuukoealat voi tarvittaessa yhdistää suuremmiksi kokonaisuuksiksi, eli 50, 75 tai jopa 100

metrin aikatutkimuskoealoiksi. Aikatutkimukset tehtiin täysinä työpäivinä klo 7:30–16:00 välillä, jolloin tuli luonnollisesti huomioitua kuljettajan vireystilassa tapahtuvat muutokset työpäivän aikana. Hakkuutyö pyrittiin pitämään mahdollisimman luonnollisena myös niin, että aikatutkimuskoealan päättyessä ei pidetty taukoja, vaan työ jatkui keskeytyksettä ja tauot pidettiin hakkuuejärjestelyistä riippumattomina kuljettajan normaalin työpäivärytmin mukaan.

Hakkuutyön aikatutkimuksessa on käytössä erilaisia tarkastelutasoja, riippuen siitä, missä laajuudessa ja millä menetelmällä hakkuutyötä tarkastellaan. Empiirisissä yksittäisille hakkuukohteille sijoittuvissa aikatutkimuksissa, kuten myös tässä tutkimuksessa tarkasteltavana ajanmenekkinä on yleensä tehoaika. Tehoajalla (E_0h) tarkoitetaan hakkuutyötä ilman keskeytyksiä ja käyttöaika ($E_{15}h$) puolestaan sisältää tehoajan lisäksi työhön liittyvät alle 15 minuutin mittaiset keskeytykset (Uusitalo 2003). Tässä tutkimuksessa tehoaika muutettiin käyttöajaksi kertomella, joka perustui aiempiin tutkimustuloksiin koneellisesta puunkorjuusta (Väättäinen ym. 2007). Varsinaiseen hakkuutyöhön (E_0h) keskeytyksiä voivat aiheuttaa esimerkiksi satunnaiset mekaaniset häiriöt hakkuukoneessa tai muut kuljettajasta tai hakkuutavasta johtuvat keskeytykset ja tauot, joiden määrää ja kesto ei lyhytkestoisissa aikatutkimuksissa voida harhottomasti selvittää (Magagnotti ym. 2012), mikä rajoittaa aikatutkimustulosten suoraa yleistettävyyttä.

Lisäksi on havaittu, että seurantatutkimukseen perustuvat tuottavuuskäyrät ovat alemmalla tasolla kuin aikatutkimuksien perusteella lasketut käyttötuntituotokset (Mäki 1999, Ryynänen & Rönkkö 2001, Sirén & Aaltio 2003). Syynä tähän on mm. se, että lyhyinä koealarupeamina toteutettavat aikatutkimukset eivät täysin vastaa käytännön työtilanteita ja lisäksi osa kuljettajista kokee tutkimuksen kilpailutilanteena. Pitkäkestoinen seurantatutkimus antaa sen vuoksi luotettavamman kuvan työn tuottavuuden tasosta vuotuisen työkauden aikana (Ryynänen & Rönkkö 2001, Sirén & Aaltio 2003). Hyvänä jatkeena tälle tutkimukselle olisi seurantatutkimus, johon osallistuisi muutama harvennus- poiminta- ja avohakkuilla käytettävä hakkuukone lapilaisessa puunkorjuun toimintaympäristössä sekä yksityismetsissä, että Metsähallituksen mailla.

Uudenaikaisten hakkuukoneiden tietojärjestelmät keräävät työvaihekohtaista ajanmenekkitietoa, mikä mahdollistaa laajojen seurantatutkimusten toteuttamisen. Seurantatutkimuksissa voidaan tuottavuustietojen ohella selvittää käyttö- ja tehoajan suhteellinen osuus tuotantoajasta, työajasta ja kokonaisajasta (Nuutinen 2013, Jylhä ym. 2019). Em. tietoa voidaan hyödyntää konekustannuslaskennoissa, samoin kuin olosuhdetietoon yhdistettyä seurantatietoa koneen polttoaineen kulutuksesta, huolloista ja konerikoista vuositasolla. Seurantatutkimuksissa rungon käyttöosan tilavuus ilmaistaan työmaakohtaisena keskiarvona, mikä on pidettävä mielessä tulosten välisessä vertailussa, kun perinteisessä aikatutkimuksessa runkokohtaista ajanmenekkiä tarkastellaan yksityiskohtaisemmin rungon käyttöosan tilavuuden ja hakkuupoistuman tiheyden mukaan (Nurminen ym. 2006, Eriksson & Lindroos 2014, Liski ym. 2020).

4.2. Polttoaineen kulutus

Tulosten perusteella hakkuutapa, tuottavuus ja vuodenaika vaikuttivat hakkuutyön polttoaineen kulutukseen, mikä vastaa aiempia tutkimustuloksia (Rieppo & Örn 2003, Brunberg 2013, Jylhä ym. 2019, Kääriäinen 2020). Tässä tutkimuksessa polttoainetta kului tuntia kohden eniten avohakkuulla (16,9–18,0 litraa) ja vähiten harvennushakkuulla (15,3–17,4 litraa). Poimintahakkuukuiden polttoaineen kulutus (16,3–17,8 litraa) asettui puolestaan em. hakkuutapojen väliin.

Kääriäisen (2020) laajassa seurantatutkimuksessa, missä tutkittiin metsäkoneiden polttoaineen kulutukseen vaikuttavia tekijöitä, hakkuukoneen tuntikohtainen polttoaineen kulutus oli avohakkuulla 15,8 litraa ja myöhemmällä harvennuksella 14,4 litraa. Riepon ja Örnin (2003) tutkimuksessa raportoitiin polttoaineen tuntikulutukseksi puolestaan avohakkuulla 12,9 litraa ja myöhemmällä harvennuksella 11,7 litraa.

Riepon ja Örnin (2003), Kääriäisen (2020) sekä tämän hankkeen tutkimustuloksissa havaittiin hakkuukoneen polttoaineen tuntikulutuksen olevan kytköksissä puuston järeyteen ja sitä kautta hakkuutyön tuottavuuteen. Järeyden kasvaessa hakkuutyön tuottavuus kasvaa kuitenkin nopeammin kuin tuntikohtainen polttoaineenkulutus, minkä vuoksi polttoaineen kulutus hakattua kiintokuutiometriä kohden (litraa per m³) laskee puuston keskijäreyden kasvaessa. Kuljettajien välillä on suuria eroja tuottavuudessa ja vähän hakattua kiintokuutiometriä kohden polttoainetta kuluttava hakkuukoneen työvuoro saattaa litroissa mitattuna kuluttaa polttoainetta työvuoron aikana huomattavasti enemmän kuin työvuoro, jossa polttoaineen kulutus kuin myös hakkuutyön tuottavuus jäävät verrokkivuoroa alemmiksi.

Kesäolosuhteissa polttoaineen tuntikulutus oli tässä tutkimuksessa 1,1–2,1 litraa pienempi kuin talviolosuhteissa. Pääsyy talvihakkuiden korkeampaa polttoaineen kulutukseen lienee lämpötila ja lumen määrä, koska hakkuukoneen telavarustus, samoin kuin koneen ja moottorin säädöt olivat samat koehakkuiden ajan. Kääriäisen tutkimuksessa (2020) hakkuukoneen tuntikohtaista polttoaineen kulutusta selittivät tilastollisesti merkitsevästi hakkuutapa, lumen määrä, moottoriteho sekä eturenkaiden tela- tai ketjuvarustus.

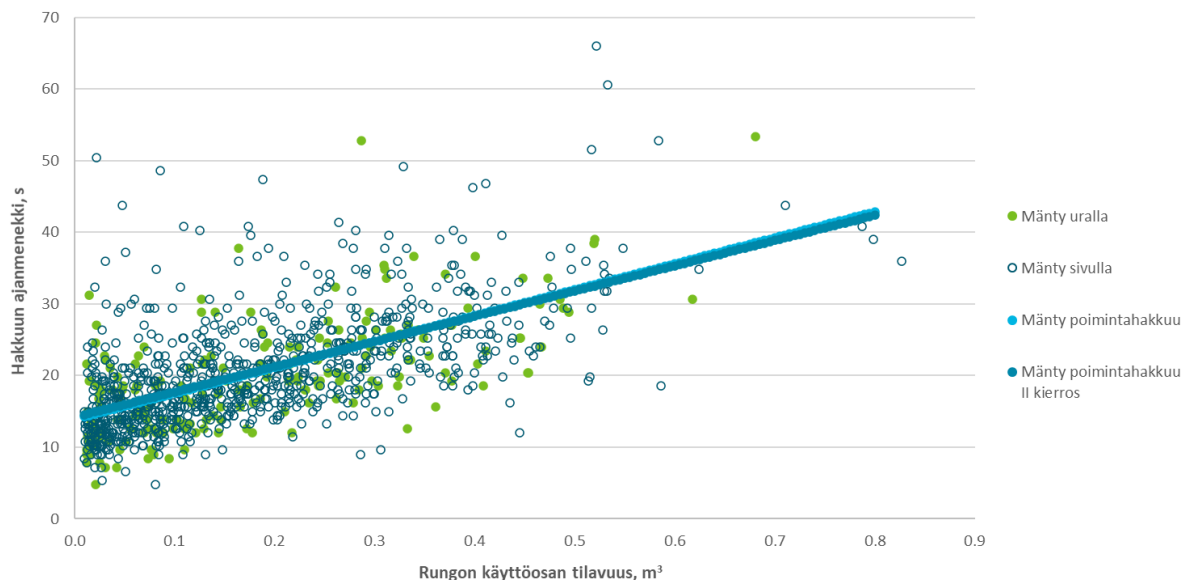
Hakkuukoneen polttoaineen kulutus hakattua ainespuu kiintokuutiometriä kohden oli tässä tutkimuksessa vuodenajasta riippuen avohakkuulla 0,73–1,11 litraa per m³, poimintahakkuulla 0,86–1,09 litraa per m³ ja harvennushakkuulla 1,08–1,35 litraa per m³. Brunbergin (2013) vuosina 2006 ja 2012 toteuttamassa seurantatutkimuksessa hakkuukoneen kiintokuutiometrikohmainen polttoaineenkulutus oli avohakkuulla 0,79–0,83 litraa per m³ (kuoreton tilavuus) ja harvennuksella 1,43–1,61 per m³ (kuoreton tilavuus). Jylhä ym. (2019) raportoivat puolestaan hakkuutyön polttoaineen kulutukseksi päätehakkuilla 0,69 litraa per m³ ja harvennuksilla 1,18 litraa per m³, kun hakkuupoistuman keskijäreydet seurantajakson aikana olivat 0,34 m³ ja 0,13 m³. Riepon ja Örnin (2003) sekä Kääriäisen (2020) tutkimuksissa hakkuukoneen polttoaineen kulutus oli avohakkuulla 0,70 ja 0,76 litraa per m³. Vastaavasti myöhemmillä harvennuksilla hakkuukoneen polttoaineen kulutus oli 1,40–1,42 litraa per m³.

4.3. Korjuuolosuhteet

Hakkuukertymän rakenteen perusteella poimintahakkuukohteet tarjosivat siirtymävaiheen hakkuissa suotuisat olosuhteet perinteiseen alaharvennukseen verrattuna, koska sekä poistuman määrä että keskijäreyys ylittävät tasaikäisrakenteiseen metsätalouteen perustuvien harvennushakkuiden vastaavat luvut. Työympäristönä molemmat hakkuutavat ovat kuitenkin hyvin samankaltaiset, eli jäävä puusto ja sen varominen vaikeuttavat työtä avohakkuuseen verrattuna. Merkittävin ero on se, että poimintahakkuussa pitää onnistua kaatamaan metsikön kookkaimpia puita niin, ettei kasvatettavaksi jäävä pienempi puusto vaurioidu. Samaa jätettävien puiden varomista hakkuukoneen kuljettajat ovat tottuneet tekemään myös harvennushakkuissa, mutta niissä hakkuupoistuma kohdistuu pääasiassa kookkaita valtapuita pienempiin puihin.

Tulevaisuuden korjuuolosuhteisiin poimintahakkuukohteilla vaikuttaa metsän kasvun ja mahdollisten korjuuvaurioiden ohella metsän uudistuminen. Olennainen kysymys on, miten erikäs rakenteisen metsän rakennetta pystytään ylläpitämään ja mitkä ovat puunkorjuuolosuhteet ja kustannukset myöhemmillä hakkuukerroilla ns. perinteisiin hakkuutapoihin verrattuna. Voimakas yläharvennus aiheuttaa puuston kasvun ja hakkuukertymän aleneman, koska metsässä on vähemmän runkoja, jotka voisivat kasvaa ja järeytyä korjuukokoisiksi seuraavaa harvennuskertaa varten. Taimettuminen vaikuttaa puolestaan ajourien sijoitteluun myöhemmillä harvennuskertoilla, eli toimiiko hakkuukone vanhoilta urilta käsin vai avataanko uudet ajourat vanhojen ajourien välissä olevalle alueelle, jos vanhat ajourat ovat taimettuneet hyvin. Syntyneen taimiaineksen varominen aiheuttaa myös omat haasteensa poimintahakkuissa poistettavien puiden kaadon ja prosessoinnin toteutukselle. Tulevaisuuden korjuuteknologian ratkaisuja ei tunneta, mikä myös vaikeuttaa toimintaympäristöanalyysia korjuuolosuhteiden ja -kustannusten osalta.

Kuvassa 37 arvioitiin puun sijainnin vaikutusta poimintahakkuun mallinnettuun ajanmenekkiin männiköissä, kun toisella poimintahakkuukierroksella poistettavat puut sijaitsevat pelkästään ajourien välisellä alueella ja hakkuukone operoi edellisellä hakkuukerralla avatuilta ajouralta käsin. Ajanmenekkimallinnuksen perusteella vaikuttaa siltä, että ajouran sijainnin vaikutus runkokohtaiseen hakkuutyön ajanmenekkiin on hyvin pieni, eli suurimmillaankin ero on 0,3–0,5 sekuntia per runko. Pääsyy pieneen ajanmenekkieroon on se, että ajourilta poistettujen runkojen suhteellinen osuus runkojen kokonaismäärästä oli vain vajaa viidesosa koko mallinnusaineistosta eli työmaalla hakatuista mäntyrungoista. Mallinnettaessa poimintahakkuun ajanmenekkiä toisella hakkuukierroksella aineiston koko (850 mäntyrunkoa) oli 204 mäntyrunkoa pienempi kuin ensimmäisen hakkuukierroksen (Kuva 23) mallinnuksessa (1054 mäntyrunkoa).



Kuva 37. Puun sijainnin vaikutus poimintahakkuun ajanmenekkiin, kun toisella poimintahakkuukierroksella poistettavat puut sijaitsevat pelkästään ajourien välisellä alueella ja hakkuukone operoi avatulta ajouralta käsin.

Kokonaisuuden kannalta puun ja ajouran sijaintia merkittävämpi tekijä hakkuutyön tuottavuuteen ja puunkorjuun kustannuksiin myös toisella poimintahakkuukierroksella on hakkuupoistuman tiheys ja hakkuussa poistettavan puuston järeyys. Puiden järeytyminen parantaa

hakkuutyön tuottavuutta ja kasvattaa hakkuukertymää, mikä puolestaan tehostaa metsäkulttuurin tuottavuutta. Kun hakkuussa poistetaan vähemmän runkoja, työpistesiirtojen runko-kohtainen ajanmenekki kasvaa. Poimintahakkuilla hakkuupoistuman tiheyden lasku 900:sta rungosta 600:aan tai 300:aan runkoon hehtaarilla nostaa runkokohtaista työpistesiirron ajanmenekkiä 2,9 sekunnista 3,7 ja 6,1 sekuntiin (Kuva 18).

4.4. Vertailu aiempiin tutkimuksiin

Poiminta- ja harvennushakkuun välisessä vertailussa hakkuutapojen tehotuntituottavuus oli samalla tasolla, kun rungon käyttöosan tilavuus oli sama, ja selvästi alempi kuin avohakkuun tuottavuus vastaavissa korjuuolosuhteissa. Saatua vertailutulosta vastaa ruotsalaisia (Jonsson 2015) tutkimustuloksia kuusivaltaisilla työmailla järjestetyistä hakkuukokeista, joissa kasvatusmetsän rakennetta muutettiin poimintahakkuiden avulla eri-ikäisrakenteiseksi metsäksi ja tuottavuutta verrattiin perinteisiin hakkuutapoihin (harvennus ja avohakkuu) lähtöpuustoltaan vastaavissa korjuuolosuhteissa. Jonssonin (2015) tutkimuksessa, aivan kuten tässäkin tutkimuksessa ajourat avattiin hakkuutyön yhteydessä, mikä lisäsi hakkuukertymää verrattuna tilanteeseen, että hakkuukone olisi työskennellyt vanhoilta avatuilta ajourilta käsin. Myöhemmillä poimintahakkuilla, jossa hakkuu tehdään olemassa olevilta ajourilta käsin, hakkuutyön runkokohtaisen ajanmenekin arvioitiin sen sijaan olevan 30 % suurempi kuin ensimmäisessä poimintahakkuussa (Jonsson 2015).

Suadicani ja Fjeld (2001) vertailivat yksiotetarvesterin tuottavuutta poiminta- ja pienaukko- hakkuilla eri-ikäisrakenteisessa kuusikossa Kaakkois-Norjan ylänköalueella. Poistuman järeys oli poimintahakkuilla selvästi suurempi kuin pienaukko- hakkuilla, mikä kompensoi pienemmän kertymän aiheuttamaa tuottavuuden alenemista. Samankokoisilla rungoilla poimintahakkuiden tuottavuus oli 10–15 % pienempi kuin pienaukko- hakkuilla. Dale ym. (1993) vertailivat erilaisten hakkuutapojen vaikutusta työn tuottavuuteen, kun tutkimusmetsiköt olivat runsaspuustoisia etelänorjalaisia kuusikoita. Poimintahakkuissa tuottavuus oli 25–36 % ja suoju- puuhakkuissa 8–21 % pienempi kuin samankokoisilla rungoilla avohakkuulla.

Harvennushakkuun ja päätehakuun mallinnetut tehotuntituottavuudet ja tuottavuuskäyrien muodot olivat hyvin samankaltaiset, kuin Nurmisen ym. (2006) tutkimuksessa mallinnetut hakkuutapakohtaiset tehotuntituottavuudet keski-suomalaisissa korjuuolosuhteissa. Pääte- hakuilla mallien välinen ero tehotuntituottavuudessa oli keskimäärin +/-1,5 m³/E₀h (keskihajonta 0,85) kun tehotunti tuottavuutta tarkasteltiin rungon käyttöosan tilavuuden mukaan välillä 0,03–0,900 m³. Harvennuksilla mallien välinen ero tehotuntituottavuudessa oli puolestaan keskimäärin +/-2,0 m³/E₀h (keskihajonta 1,54) kun tehotunti tuottavuutta tarkasteltiin rungon käyttöosan tilavuuden mukaan välillä 0,03–0,300 m³. Molemmissa tutkimuksissa korjuuohjeet, puutavaran mittaustapa ja käytetyt tutkimusmenetelmät olivat samat, mikä parantaa tutkimustulosten välistä vertailtavuutta.

Saadut tulokset ovat myös hyvin linjassa Eriksson ja Lindroosin (2014) sekä Liski ym. (2020) seurantatutkimuksien tulosten kanssa, vaikka tutkimusmenetelmien ja puutavaran mittaustapojen välisten erojen takia tuottavuudet eivät olekaan suoraan verrannollisia tämän tutkimuksen tulosten kanssa. Päätehakuilla seurantatutkimuksien (Eriksson & Lindroos 2014, Liski ym. 2020) tuottavuusero tämän tutkimuksen tehotuntituottavuuksiin oli keskimäärin +/-2,4–3,7 m³/E₀h, kun tehotunti tuottavuutta tarkasteltiin rungon käyttöosan tilavuuden mukaan välillä 0,05–0,900 m³. Harvennuksilla vastaava tuottavuusero oli +/-2,6–6,2 m³/E₀h, kun tehotunti tuottavuutta tarkasteltiin rungon käyttöosan tilavuuden mukaan välillä 0,05–0,800 m³.

Päätehakuilla seurantatutkimuksiin perustuvat tehotuntituottavuudet olivat pääsääntöisesti alemmat kuin tässä tutkimuksessa saadut tehotuntituottavuudet (pl. pienet runkotilavuudet). Harvennuksilla seurantatutkimusten tehotuntituottavuudet sen sijaan olivat tämän tutkimuksen tuloksia korkeammat aina rungon tilavuuteen $0,165\text{--}0,300\text{ m}^3/\text{E}_0\text{h}$ saakka.

4.5. Korjuukustannukset

Vuonna 2021 puunkorjuun hakkuutapakohtaiset keskikustannukset olivat ensiharvennuksella $17,50\text{ €/m}^3$, muilla harvennuksilla $14,02\text{ €/m}^3$ ja uudistushakkuilla $8,50\text{ €/m}^3$. Kun em. toteutuneita yksikkökustannuksia vertaa tässä tutkimuksessa laskettuihin puunkorjuun hakkuutapakohtaisiin kustannuksiin, erot eivät ole suuret, etenkin kun ottaa huomioon voimistuneen kustannusinflaation ja tilastointiviiveen.

Poimintahakkuiden konekustannusten toteutuneesta rakenteesta ei ole saatavilla julkisia seuranta-aineistoja tai tutkimustuloksia. Oletettavaa joka tapauksessa on, että keskeisten kustannustekijöiden osalta poimintahakkuiden kustannusrakenne vastaa tai on hyvin lähellä harvennushakkuiden kustannusrakennetta. Poimintahakkuiden hakkuutyö on hieman hitaampaa kuin perinteisillä harvennushakkuilla mutta siirtymähakkuiden suurempi hakkuukertymä vastavuoroisesti parantaa metsäkuljetuksen tuottavuutta perinteiseen harvennustapaan verrattuna, jos tavaralajien määrä pysyy kohtuullisena.

Vuodenaikojen ja säätilojen vaihtelut vaikuttavat korjuuolosuhteisiin ja aiheuttaen toisinaan ongelmia käytännön toimintoihin etenkin kasvatushakkuilla. Puunkorjuu painottuu usein talvikauteen, sillä heikosti kantavien maiden hakkuut voidaan yleensä tehdä vain jäätyneen maan aikana. Keskimääräisen korjuutyömaan koko määrää sen, kuinka paljon työaikaa kuluu metsäkoneiden siirtoon ja siirtojen odotuksiin sekä työmaata valmistaviin aputoimintoihin, jotka lisäävät tuottamattoman työajan myötä konekustannuksia sekä metsäkoneiden siirtokustannuksia (Väätäinen ym. 2023).

Korjuun kausivaihtelu aiheuttaa sen, että kevät- ja kesäkuukausina osa metsäkoneista on vajakäytössä, kun kaluston määrä on mitoitettu pääsesongin korjuumäärien mukaan. Vuosisuorituksen hupenemisesta seuraa se, että metsäkoneiden pääomakustannukset jakautuvat pienemmälle korjuumäärälle, mikä heijastuu kohonneina puunkorjuun kustannuksina. Nykyisellään poimintahakkuiden suhteellinen osuus hakkuupinta-alasta ja korjatusta puumäärästä on alle 10 % Lapissakin (Suomen metsäkeskus 2020) mutta jatkossa hakkuutavan merkitys voi korostua mm. EU:n politiikkaohjauksen kautta (Väätäinen ym. 2023).

4.6. Jäävän puuston rakenne ja kehitys poimintahakkuussa

Poimintahakkuun keskeisenä tavoitteena on säilyttää metsikön jatkuvapeliteisyys ja tuottaa varsinkin arvokasta tukkipuuta tasaisin väliajoin. Jotta nämä tavoitteet voidaan saavuttaa, pitää luontaisen uudistumisen olla riittävää, ja alikasvispuiden kehittyä ainespuu mittoihin kohtuu ajassa. Poimintahakkuu metsikössä tavoittelee eri-ikäisrakenteista puustoa, jossa puuston läpimittajakauuma on oikealle laskeva eli pieniä puita on suuria enemmän (Surakka & Sirén 2007). Kulminkivaaralla puusto edusti jo valmiiksi eri-ikäisrakenteista puustoa, johon poimintahakkuu soveltui puuston rakenteen puolesta hyvin. Sen sijaan Hirvaalla puusto oli selvästi tasaikäisempää, ja poimintahakkuu edusti nk. siirtymävaiheen hakkuuta, jossa puuston rakennetta muutettiin kohti eri-ikäisrakenteisuutta.

Uudistuminen, puiden alkukehitys, riittävä alikasvosreservi ja vallitussa asemassa olevien puiden elpyminen ovat ratkaisevassa asemassa, kun arvioidaan eri-ikäisrakenteisen metsikön pitkän aikavälin kasvu- ja tuotosvaikutuksia sekä hakkuumahdollisuuksia. Mänty uudistuu heikosti ja taimet kasvavat hitaasti päälylypuuston alla (Hallikainen ym. 2020). Sen takia männikön poimintahakkuissa puustoa pitää poistaa voimakkaasti, että hakkuun jäljiltä jäävä puusto on riittävän harvaa. Tällä pyritään luomaan edellytykset luontaiselle uudistumisella ja taimien sekä nuorten puiden kehitykselle.

Puiden elpymistä poimintahakkuiden jälkeen on tutkittu lähinnä kuusikoissa, mutta yleisen näkemyksen mukaan valopuuna mänty elpyy hitaammin kuin kuusi. Vaikka voimakkaan poimintahakkuun jälkeen kasvutilaa vapautuu paljon, varjostettuna kasvaneilla puilla kestää vuosia vahvistaa juuristojaan ja kasvattaa latvuksiaan ennen kuin ne voivat hyödyntää suuremman kasvutilan (Hynynen ym. 2022). Sen vuoksi puuston kasvun nopeutuminen poimintahakkuun jäljiltä on hitaampaa kuin harvennuksen jälkeinen kasvureaktio jaksollisen kasvatuksen metsässä, jossa jäävä puusto koostuu pääosin metsikön elinvoimaisimmista valtapuista (Hynynen 2019, Bianchi ym. 2020).

Eri-ikäisrakenteisena kasvatettavassa metsässä tulee olla riittävästi alikasvoksia, jotka korvaavat poimintahakkuissa poistettuja puita. Kulmunkivaaralla alikasvosta oli jo valmiina jonkin verran, toisin kuin Hirvaalla. Tämä merkinnee sitä, että Hirvaalla hitaan uudistumisen seurauksena puuston muuttaminen eri-ikäisrakenteiseksi saattaa kestää vuosikymmeniä. Tällä on suuri merkitys tulevien poimintahakkuiden ajankohtiin ja hakkuukertymiin. Toisella poimintahakkuu kierroksella hakkuukertymä ja poistuman järeys oletettavasti ovat korjuun kannalta suotuisat, mutta myöhemmillä hakkuukerroilla sekä kertymä että poistuman järeys pienenevät, etenkin jos hakkuusykli aiotaan pitää kohtuullisena.

Kulmunkivaaralla puusto oli jo valmiiksi eri-ikäisrakenteista ja alikasvosreserviä oli olemassa, mikä luo paremmat edellytykset poimintahakkuille jatkossa. Tosin vallittujen latvuserosten puiden kunto (välipuut, alikasvos) oli paikoitellen heikko, ja niiden kasvun elpyminen on epävarmaa tai hidasta. Tämä voi pidentää hakkuukiertoa ja pienentää hakkuukertymää etenkin tukkipuun saannon osalta.

Tutkimustietoa poimintahakkuiden vaikutuksista männikön kehitykseen sekä tuleviin hakkuumahdollisuuksiin ei juurikaan ole saatavilla. Se mihin suuntaan puuston rakenne lopulta kehittyi poimintahakkuiden jälkeen männikössä, on vaikeasti ennustettavissa. Poimintahakkuurakennetta ei välttämättä pystytä ylläpitämään ja tuloksena voi olla kaksijaksoinen metsikkö, jossa ylispuuston alle syntyy alikasvos. Tällöin seuraava hakkuu olisi poimintahakkuun sijasta ylispuiden poisto ja alikasvoksen harvennus (ylispuukasvatus). Tämä kehityssuunta voi olla mahdollinen erityisesti Hirvaalla, jossa alikasvoksen määrä oli vähäinen.

Poimintahakkuumänniköille ei ole olemassa kasvatusmalleja, joissa olisi määritelty puuston määrät ennen hakkuuta ja hakkuun jälkeen. Hakkuun ajankohdan kriteerinä voidaan käyttää esim. minimihakkuukertymää, jolla poimintahakkuu olisi taloudellisesti perusteltua. Uudistumisen turvaamiseksi poimintahakkuumänniköt kasvatetaan kuitenkin harvana, millä on suora vaikutus kasvuun. Alhainen puustopääoma merkitsee alhaisempaa puuston tilavuuskasvua, ja esimerkiksi eri-ikäisessä kuusikossa puustopääoman alentaminen vähentää kasvua voimakkaammin kuin tasaikäisessä harvennuskuusikossa vaikka puuston tilavuuksissa ei olisi eroa (Hynynen ym. 2019).

Sekä Hirvaalla että Kulmunkivaaralla poimintahakkuut tehtiin voimakkaina, ja jäävän puuston pohjapinta-alan oli 7–8 m²/ha. Molemmilla kohteilla puuston kasvu on tulevana vuosina hidasta alhaisen puustopääoman seurauksena. Jos tavoitehakkuukertymä on 40–50 m³/ha, niin seuraava poimintahakkuu tehtäisiin sekä Hirvaalla ja Kulmunkivaaralla arviolta 30 vuoden kulluttua, kun puuston pohjapinta-alan saavuttaa 14 m²/ha. Pitkän aikavälin hakkuukertymien ja -syklin arviointi on kuitenkin tutkimustiedon puuttuessa epävarmaa. Jos puuston eri-ikäisrakente onnistutaan koeleimikoissa ylläpitämään, hakkuusykli muodostunee puuntuotannon näkökulmasta sittenkin pitkäksi.

5. Johtopäätökset

Tutkimuksen tavoitteena oli selvittää, miten jatkuvapeitteisessä metsäkasvatuksessa käytävä poimintahakkuu eroaa hakkuun tuottavuuden, puunkorjuun kustannusten ja korjuujäljen osalta tasaikäisrakenteisessa metsätaloudessa käytettävistä alaharvennuksesta ja avohakkuusta. Tutkimukseen valittiin Lapista mäntyvaltaisia kuivahkon kankaan metsiköitä, joissa oli luonnostaan puuston eri-ikäisrakenteisuutta, ja joihin voitiin rintarinnan soveltaa sekä jatkuvan kasvatuksen poimintahakkuuta että jaksollisen metsänkasvatuksen hakkuutapoja.

Tutkimuskohteilla koealajärjestelyt onnistuttiin toteuttamaan hyvin, minkä ansioista hakkuupoistuman tiheyden ja rungon käyttöosan tilavuuden vaihtelu oli tarkoituksenmukainen. Kootun aineiston pohjalta laadittiin tuottavuusmallit harvennushakkuulle, poimintahakkuulle ja avohakkuulle. Korjuukustannusten vertailulaskelmat (hakkuu + metsäkuljetus) perustuivat tuotettuihin hakkuun tuottavuusmalleihin sekä olemassa oleviin metsäkuljetuksen tuottavuusmalleihin ja metsäkoneiden kustannuslaskentapohjiin. Vertailulaskelmien korjuuolosuhteet johdettiin aikatutkimuskoealatiетоjen pohjalta.

Avohakkuun mallinnettu käyttötuntituottavuus oli rungon käyttöosan tilavuudesta riippuen 1,0–7,0 m³/E₁₅h suurempi ja vastaavasti hakkuukustannus 0,3–3,8 €/m³ alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla kun hakkupoistuman tiheys oli 500 runkoa hehtaarilla ja hakattujen runkojen järeys oli 0,03–0,8 m³. Harvennus- ja poimintahakkuun välinen ero hakkuun tuottavuudessa ja kustannuksessa oli hyvin pieni. Hakkuukustannusvertailussa poiminta- ja harvennushakkuiden kustannuskäyrät leikkasivat laskentaperusteista riippuen, kun rungon käyttöosan tilavuus oli 0,06–0,2 m³. Em. suuremmilla rungon käyttöosaan tilavuuksilla alaharvennuksen hakkuukustannukset olivat poimintahakkuuta 0,01–0,10 €/m³ alemmat.

Poimintahakkuissa poistettavien puiden valinta tehtiin yläharvennusperiaatteella, eli poistettavat puut olivat pääsääntöisesti järeämpiä ja harvennusvoimakkuus metsän uudistumisen edistämiseksi suurempi kuin alaharvennusperiaatetta noudattavilla harvennushakkuilla, mikä ilmenee alemmina puunkorjuukustannuksina hakkuutapojen välisessä kustannusvertailussa aikatutkimuskoealojen mukaisissa korjuuolosuhteissa. Vastaavasti suuremmasta hakkuutyön ja metsäkuljetuksen tuottavuudesta johtuen avohakkuilla puunkorjuukustannus (€/m³) on alempi kuin harvennus- ja poimintahakkuilla, vaikka hakkuukertymä tai rungon käyttöosan keskitilavuus olivatkin samat.

Tulevaisuuden korjuuolosuhteisiin poimintahakkuukohteilla vaikuttaa metsän kasvun ja mahdollisten korjuuvaurioiden ohella metsän uudistuminen. Olennainen kysymys on, miten eri-ikäisrakenteisen metsän rakennetta pystytään ylläpitämään ja mitkä ovat puunkorjuuolosuhteet ja kustannukset myöhemmillä hakkuukerroilla ns. perinteisiin hakkuutapoihin verrattuna. Voimakas yläharvennus aiheuttaa puuston kasvun ja hakkuukertymän aleneman, koska metsässä on vähemmän runkoja, jotka voisivat kasvaa ja järeytyä korjuukokoisiksi seuraavaa harvennuskertaa varten.

Viitteet

- Ahtikoski, A., Repola, J. & Viitala, E.-J. 2022. Talous. Julkaisussa: Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022. Jatkovapeitteinen metsänkasvatus : Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 97–100.
- Aro, K., Karvinen, S., Pynnönen, S., Soini, K. & Vehmasto, E. (toim.) 2022. Näkökulmia metsäalan kestävyyskeskusteluun: Systeminen lähestymistapa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 85/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 115 s.
- Bianchi, S., Huuskonen, S., Siipilehto, J. & Hynynen, J. 2020. Differences in tree growth of Norway spruce under rotation forestry and continuous cover forestry. *Forest Ecology and Management* 458. 7 p.
- Dale, O., Kjøstelsen, L. & Aamodt, H.E. 1993. Mekaniserte, lukkete hogster (Mechanized selective cutting). In: Aamodt, H.E. (ed.) 1993. Flerbruksrettet driftsteknikk (Forest operations for multiple use). Rapport fra Skogforsk 20/93: 1–40
- Eriksson, M. & Lindroos, O. 2014. Productivity of harvesters and forwarders in CTL in northern Sweden based on large follow-up datasets. *International Journal of Forest Engineering* 25(3): 179–200.
- Brunberg, T. 2013. Bränsleförbrukningen hos skogsmaskiner 2012. Arbetsrapport Från Skogforsk 789. Skogforsk. Uppsala. 18 s.
- Hallikainen, V., Hökkä, H., Hyppönen, M., Rautio, P. & Valkonen, S. 2020. Männyn luontainen uudistuminen pienaukkohakkuun jälkeen Lapissa. *Acta Lapponica Fenniae* 29: 10–22.
- Hynynen, J., Eerikäinen, K., Mäkinen, H. & Valkonen, S. 2019. Growth response to cuttings in Norway spruce stands under even-aged and uneven-aged management. *Forest Ecology and Management* 437: 314–323
- Hynynen, J., Salminen, H. & Hökkä, H. 2022. Puuntuotanto ja tuotos. Julkaisussa: Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022. Jatkovapeitteinen metsänkasvatus : Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 42–51.
- Jonsson, R. 2015. Prestation och kostnader i blädning med skördare och skotare. Arbetsrapport från Skogforsk nr 863–2015. Skogforsk. Uppsala. 28 s.
- Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M. & Korpunen H. 2019. Koneellinen hakkuu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 55 s.
- Kariniemi, A. 2006. Kuljettajakeskeinen hakkuukonetyön malli – työn suorituksen kognitiivinen tarkastelu. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 38. Helsinki. 127 s.
- Kuitto, P.-J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. *Tiedotus* 410. Metsäteho. 38 s. + liitteet.
- Kärhä, K., Keskinen, S., Kallio, T., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006. Ennakkoraivaus osana ensiharvennuspuun korjuuta. *Metsätehon raportti* 187. 77 s. + liitteet.

- Kääriäinen, H. 2020. Puunkorjuun polttoaineen kulutus ja sen mallinnus. Metsätieteiden pro gradu. Itä-Suomen yliopisto, Luonnontieteiden ja metsätieteiden tiedekunta, Metsätieteiden osasto. Joensuu. 54 s.
- Laitila, J., Väättäin, K., & Kilpeläinen, H. 2020. Integrated harvesting of industrial roundwood and energy wood from clearcutting of a Scots pine-dominated peatland forest. *International Journal of Forest Engineering* 31(1): 19–28.
- Liski, E., Jounela, P., Korpunen, H., Sosa, A., Lindroos, O. & Jylhä, P. 2020. Modeling the productivity of mechanized CTL harvesting with statistical machine learning methods. *International Journal of Forest Engineering* 31(3): 253–262.
- Magagnotti N., Spinelli R., Acuna M., Bigot M., Guerra S., Hartsough B., Kanzian C., Karha K., Lindroos O. & Roux S. 2012. Good practice guidelines for biomass production studies. Sesto. Fiorentino (Italy): CNR IVALSA; 50 s.
- Malinen, J., Taskinen, J., & Tolppa, T. 2018. Productivity of cut-to-length harvesting by operators' age and experience. *Croatian Journal of Forest Engineering* 39(1): 14–22.
- Miina, J., Tolvanen, A., Kumpula, J., Tyrväinen, L. 2020. Metsien luonnontuotteet, virkistyskäyttö ja porolaitumet jatkuvapeitteisessä ja jaksollisessa kasvatuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja 2020-10345*. Katsaus. 18 s.
- Mäki, J.-P. 1999. Runko-ohjattavat erikoistraktorit harvennushakkuussa. *Työtehoseuran monisteita 4/1999 (74)*. 78 s.
- Nurminen, T., Korpunen, H. & Uusitalo, J. 2006. Time consumption analysis of the mechanized cut-to-length harvesting system. *Silva Fennica* 40(2): 335–363.
- Nuutinen, Y., Väättäin, K., Heinonen, J., Asikainen, A. & Röser, D. 2008. The accuracy of manually recorded time study data for harvester operation shown via simulator screen. *Silva Fennica* 42(1): 63–72.
- Nuutinen, Y. 2013. Possibilities to use automatic and manual timing in time studies on harvester operations. *Dissertationes Forestales* 156. 68 s.
- Nuutinen, Y. & Muhonen, T. 2022. Puunkorjuu. Julkaisussa: Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022. *Jatkuvapeitteinen metsänkasvatus: Synteesiraportti*. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 52–62.
- Ovaskainen, H. 2009. Timber harvester operators' working technique in first thinning and the importance of cognitive abilities on work productivity. *Dissertationes Forestales* 79. 62 s.
- Ovaskainen, H. 2012. Työmallit koneellisessa puunkorjuussa. *Metsätehon raportti 22*. 45 s. + liite.
- Purfürst, F.T. & Eler, J. 2011. The human influence on productivity in harvester operators. *International Journal of Forest Engineering* 22(2): 15–22.
- Rajamäki, J., Kariniemi, A., & Oijala, T. 1996. Koneellisen harvennushakkuun tuottavuus. *Metsätehon raportti 8*. Metsäteho Oy. Helsinki. 20 s.

- Rieppo, K. & Örn, J. 2003. Metsäkoneiden polttoaineen kulutuksen mittaaminen. Metsätehon raportti 148. Metsäteho Oy. Helsinki. 23 s.
- Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022. Jatkovapeitteinen metsänkasvatus : Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 132 s.
- Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannus. Työtehoseuran julkaisuja 381. 67 s.
- Sirén, M. & Aaltio, H. 2003. Productivity and costs of thinning harvesters and harvesterforwards. *International Journal of Forest Engineering* 14(1): 39–48.
- Strandström, M. 2022. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2021. Metsätehon tulosalvosarja 5/2022. Metsäteho Oy. Vantaa. 32 s.
- Suadicani, K. & Fjeld, D. 2001. Single tree and group selection in montane Norway spruce stands: factors influencing operational efficiency. *Scandinavian Journal of Forest Research* 16(1): 79–87.
- Suomen metsäkeskus 2020. Jatkuvan kasvatuksen hakkuut ovat hieman lisääntyneet. Uutinen 24.11.2020 09:52. <https://www.metsakeskus.fi/fi/ajankohtaista/jatkuvan-kasvatuksen-hakkuut-ovat-hieman-lisaantyneet>
- Surakka, H. & Sirén, M. 2007. Poimintahakkuiden puunkorjuun nykytietämys ja tutkimustarpeet. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2007: 373–390.
- Tarkastusohje. 2022. Suomen metsäkeskus. Lahti. 86 s.
- Uusitalo, J. 2003. Metsäteknologian perusteet. Metsälehti Kustannus. 230 s.
- Uusitalo, J. & Kivinen V.-P. 2022. Metsäkoneopin oppimisympäristö (<https://puuhuolto.fi/metsakoneoppi/>). Helsingin yliopisto, metsätieteiden osasto.
- Valkonen, S. 2022. Jatkovapeitteinen kasvatus- mitä se on? Julkaisussa: Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022. Jatkovapeitteinen metsänkasvatus: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 9–18.
- Valkonen, S., Rautio, P., Hökkä, H. & Saarinen, M. 2022. Metsän uudistuminen. Julkaisussa: Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.) 2022. Jatkovapeitteinen metsänkasvatus : Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022. Luonnonvarakeskus. Helsinki. s. 19–34.
- Väätäinen, K., Liiri, H., Asikainen, A., Sikanen, L., Jylhä, P., Rieppo, K., Nuutinen, Y. & Ala-Fossi, A. 2007. Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa. Metlan työraportteja 48. Metsäntutkimuslaitos. Helsinki. 78 s.
- Väätäinen, K., Mutanen, A., Anttila, P., Laitila, J., Routa, R., Kniivilä, M., Ahtikoski, A. & Lindblad, J. 2023. EU-politiikkojen mahdollisia vaikutuksia puun korjuukustannuksiin: kustannuslaskentamallin kehittäminen ja skenaariotarkastelu. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 37/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 38 s.



**Löydät meidät
verkosta**

luke.fi

