

↗ Puunkorjuun ajanmenekki ja kustannukset jatkovapeitteisessä suometsien kasvatuksessa – tapaustutkimus

Time consumption and harvesting cost in continuous cover management of peatland forests — A case study

Pentti Niemistö & Paula Jylhä

*Pentti Niemistö, Luonnonvarakeskus, Kampusranta 9 C, 60320 Seinäjoki,
e-mail: pentti.niemisto56@gmail.com
Paula Jylhä, Luonnonvarakeskus, Teknologiankatu 7, 67100 Kokkola,
e-mail: paula.jylha@luke.fi*

Tässä tapaustutkimuksessa laadittiin puutason ajanmenekkimallit suometsän pienaukko-hakkuuseen, poimintahakkuuseen ja yläharvennukseen aikatutkimuksen perusteella sekä laskettiin korjuukustannukset kannolta tienvarteen. Poimintahakkuun puukohtainen ajanmenekki oli keskimäärin 40 % ja yläharvennuksen 47 % pienaukko-hakkuuta suurempi, koska etenkin hakkuukoneen siirtymisiin ja puutavaran järjestelyyn kului poimintahakkuussa ja yläharvennuksessa enemmän aikaa.

Mäntyjen hakkuu oli pääsääntöisesti kuusten ja koivujen hakkuuta joutuisampaa. Hiljattain tukkipuun koon mitat saavuttaneiden mäntyjen hakkuu kuitenkin hidastui, koska laatuvikojen vuoksi runkoa juoksutettiin usein hakkulaitteessa edestakaisin ennen katkaisupäätöksen tekoa. Rinnankorkeusläpimitaltaan yli 30 cm koivujen hakkuun ajanmenekki oli karsintaa vaikeuttavien paksujen ja pystyjen oksien vuoksi selvästi vastaavan kokoisia havupuita suurempi.

Laskennalliset korjuukustannukset olivat samaa luokkaa kuin tavanomaisessa tasarakenteisten metsien puunkorjuussa. Puustotason korjuukustannukseksi saatiin pienaukolla 9,0 €/m³, poimintahakkuilla 9,6 €/m³ ja yläharvennuksilla 11,2 €/m³. Suuren runkokoon ansiosta puustotason hakkuukustannus oli poimintahakkuilla vain vähän korkeampi kuin pienaukolla. Yläharvennuksilla muita pienempi runkokoko nosti hakkuukustannusta. Metsäkuljetuskustannus riippui eniten kuormakoosta ja ajomatkasta. Kantavuuden salliessa tukkikuormien suurentaminen vähensi selvästi metsäkuljetuksen kustannusta isoilla puilla, jolloin poimintahakkuun puunkorjuukustannus aleni lähelle pienaukko-hakkuun kustannusta. Pikkutukkien teko nosti hieman kuljetuskustannusta, kun puiden rinnankorkeusläpimitta oli 15–20 cm.

Avainsanat: hakkuu, jatkovapeitteinen metsänkasvatus, korjuukustannus, metsäkuljetus, pienaukko, poimintahakkuu, tuottavuus, yläharvennus

Johdanto

Jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella tarkoitetaan puuntuotantoa ilman avohakkuita. Metsä pidetään puustoisena poistamalla hakkuussa suurimpia puita ja jättämällä kasvamaan pienempiä puita ja alikasvoksia. Uusia taimia syntyy aukkoihin (Valkonen 2022). Menetelmä sopii erityisesti suometsiin, joiden puusto on usein jo valmiiksi erirakenteinen (Sarkkola ym. 2004). Suometsissä jatkuvapeitteisellä metsänkasvatuksella voidaan vähentää kunnostusojitustarvetta, jos puuston haihdutus riittää pitämään pohjaveden pinnan puuston kannalta riittävän alhaalla. Pohjaveden pinnankorkeusvaihtelun pienentyminen voi myös vähentää turpeen hajoamisesta johtuvia hiilidioksid-, metaani- ja typpioksiduulipäästöjä. Avohakkuista ja kunnostusojituksesta luopuminen puolestaan pienentää vesistöjen kuormitusta (Nieminen ym. 2018).

Metsänkasvatuksen kannattavuuslaskelmissa käytetään usein tienvarsihintoja, jolloin laskelmiin sisällytetään puunkorjuukustannukset. Ne ovat jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa korkeammat kuin tasaikäisrakenteisessa (Pukkala ym. 2012; Tahvonen & Rämö 2016), pääasiassa pienempien hakkuukertymien vuoksi. Puunkorjuukustannusten laskenta perustuu usein malleihin, joissa ajanmenekkiä selitetään hakattujen puiden keskikoon ja hakkuukertymien perusteella (Juutinen ym. 2018; Väättäinen ym. 2021). Tämä lähestymistapa sopii tasarakenteisiin ja hakkuutaltaan yhtenäisiin leimikoihin. Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuissa sekä lähtöpuuston että hakattavan puuston rakenne vaihtelevat suuresti, joten todellisen ajanmenekin ja korjuukustannusten ennustaminen keskitunnusten avulla on epäluotettavaa. Jatkuvapeitteisessä metsänkasvatuksessa sama leimikko saattaa sisältää pienialaisesti erilaisia hakkuutapoja, kuten poimintahakkuuta, yläharvennusta, alikasvoksen vapautusta ja pienaukko- tai kaistalehakkuuta. Poimintahakkuussa poistetaan pääasiassa suuria puita ja tehdään samalla tilaa alikasvoksen kehittymiselle ja uuden taimiaineksen synnylle. Vialliset ja sairaat puut poistetaan, ja tiheitä pienten puiden ryhmiä voidaan tarvittaessa harventaa. Yläharvennuksella tasaikäisrakenteista metsää muutetaan eri-ikäisrakenteiseksi poistamalla pää-

asiassa isoimpia puita. Pienemmät puut jätetään ja alikasvokset säästetään. Pienaukkohakkuussa metsään tehdään pieniä aukkoja, joiden odotetaan taimettuvan luontaisesti. Pienaukot edistävät olemassa olevan alikasvoksen kehitystä ja luovat edellytyksiä valoa vaativien puiden kehitykselle. Kaistalehakkuu rinnastetaan pienaukkohakkuuseen. Siinä metsää hakataan aukeaksi kaistaleittain, jolloin reunametsä siementää hakatun alueen (Valkonen 2022). Metsälain mukainen uudistamisvelvoite ei koske pienaukkoja, jos niiden pinta-ala on korkeintaan 0,3 ha (Metsälaki 20.12.2013/1085).

Yksityiskohtainen tieto korjuukustannuksista mahdollistaisi hakkuutapojen väliset kannattavuusvertailut (Juutinen ym. 2020). Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuutapojen tuottavuustutkimus rajoittuu Suomessa toistaiseksi lähinnä opinnäytetöihin (esim. Laamanen 2014; Repo 2020; Toikka 2021).

Poimintahakkuissa on sekä tasaikäisen metsikön myöhempien harvennusten että päätehakkuiden piirteitä. Työympäristö ja kertymä muistuttavat varttuneen puuston harvennusta, mutta poistettavien puiden keskitilavuudet ovat lähempänä päätehakkua kuin harvennusta. Toisaalta eri-ikäisrakenteisuutta pitää edistää harventamalla myös pienempää puustoa. Puutavaralajien määrä voi olla suuri poistettavien puiden kokovaihtelun vuoksi, mutta puutavaralajikohtaiset kertymät jäävät usein pieniksi. Jäävän puuston varominen lisää runkokohtaista ajanmenekkiä päätehakkuusiin verrattuna (Surakka & Sirén 2007; Niemistö ym. 2012).

Tutkimuksen tavoitteet

Jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen tai sitä tavoittelevien hakkuiden kustannuslaskennassa tarvitaan puutason ajanmenekkimalleja, koska hakkuukertymä, puulajikoostumus ja runkojen kokojakauma vaihtelevat suuresti. Puustotason tunnuksiin perustuvien ja yleistettävissä olevien ajanmenekki- ja tuottavuusmallien laatiminen useille eri-ikäisrakenteisten metsien hakkuutavoille on työlästä, vaikeaa ja ilmeisen hyödytöntä, koska olosuhteet ja hakkuun voimakkuudet sekä metsänkasvatuksen tavoitteet vaihtelevat. Tämän tapaustutkimuksen tavoitteena oli laatia esimerkki

hakkuun puutason ajanmenekkimalleista ja laskea korjuukustannukset erilaisilla hakkuutavoilla esimerkkileimikossa. Tällaisia malleja voitaisiin käyttää korjuun suunnittelussa tai simuloinneissa, joissa tutkitaan jatkuvapitteisen metsänkasvatuksen mahdollisuuksia ja kannattavuutta. Lisäksi yleistymässä oleva runkohinnoittelu edellyttää entistä tarkempaa tietoa erikokoisten puiden korjuukustannuksista.

Aineisto ja menetelmät

Hakkuukoe

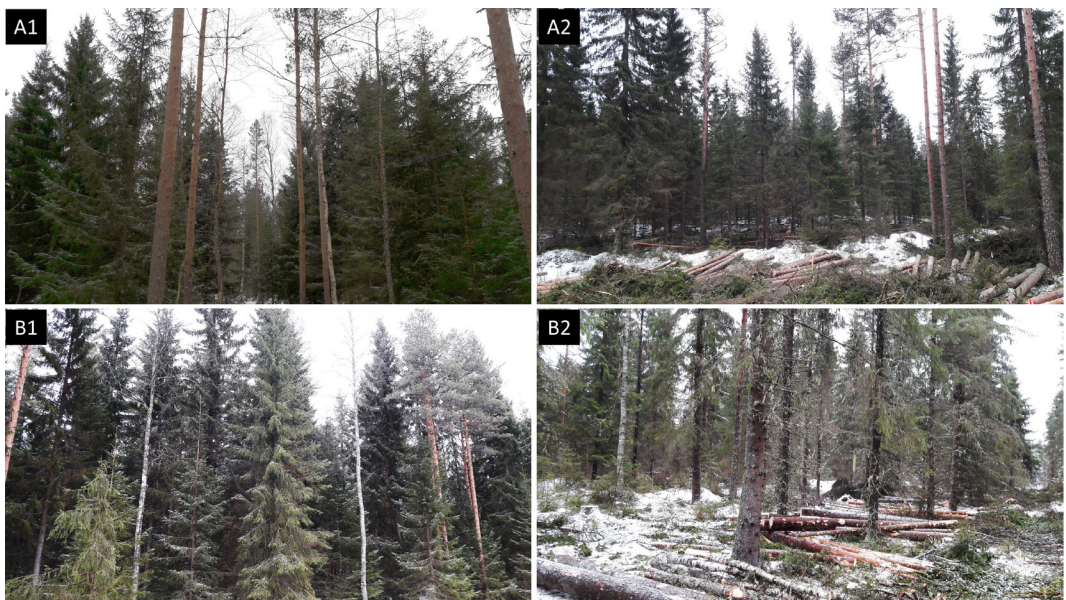
Hakkuu toteutettiin talvella 2019 Etelä-Pohjanmaalla sijaitsevalla mustikkaturvekankaalla, jonka edellinen harvennus oli tehty vuonna 1999 jatkuvapitteistä metsänkasvatusta silmällä pitäen. Hakkuu tehtiin puoliksi vanhoilta ja uusilta ajourilta. Koealue (4 ha) jaettiin kuuteen lohkokoon (Kuvat 1–2), joiden hakkuutavan valinnassa otettiin huomioon puuston rakenne. Kolmena päivänä valoisaan aikaan tehdyssä hakkuussa käytettiin noin vuoden vanhaa Ponsse Beaver -hakkuukonetta, joka on sekä harvennus- että päätehakkuilla

käytettävä 6-pyöräinen yleiskone. Kuljettajalla oli yli 10 vuoden työkokemus koneellisesta hakkuusta, erityisesti harvennuksilta, ja hänellä oli kokemusta myös suometsien poimintaluonteisista hakkuista. Hakkuu videoitiin, ja työvaiheet kelloitettiin myöhemmin videolta käyttäen Aikakone-aikatutkimussovellusta (Niemistö ym. 2012).

Videotallenteiden perusteella hakkuukoneen työaika jaettiin päätyöaikoihin ja apu aikoihin. Päätyöajat liittyvät kaikkien runkojen käsittelyyn, kun apuajat eivät esiinny säännönmukaisesti kaikilla rungoilla.

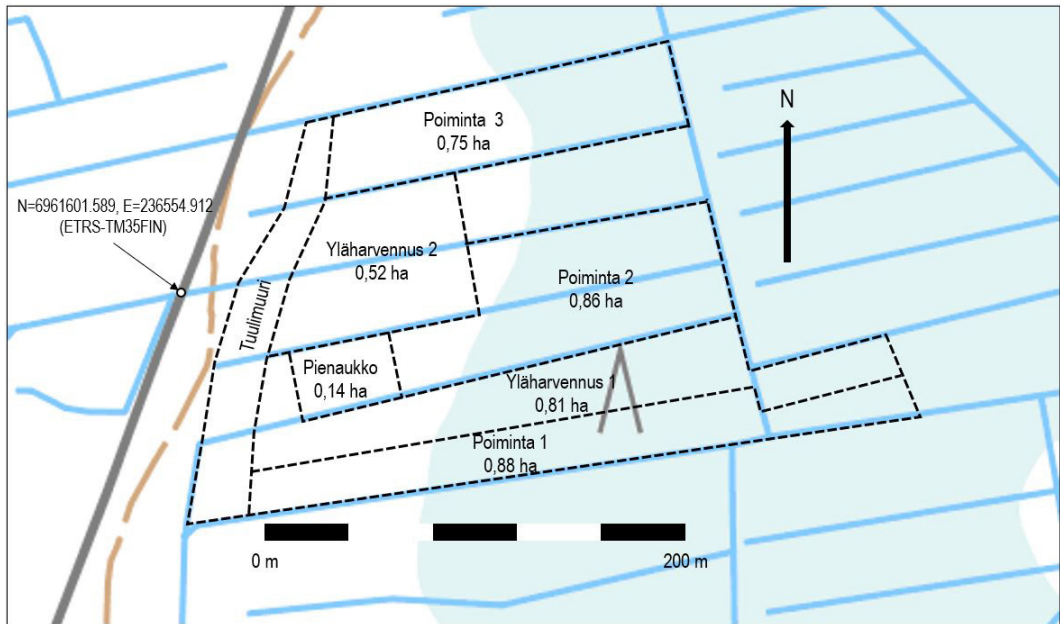
Päätyöaika

- Hakkuulaitteen vienti puulle: Hakkuulaitteen siirto ja puuhun tarttuminen.
- Kaato ja rungon siirto: Kaatosahaus ja mahdollinen rungon siirto käsittelypisteeseen.
- Karsinta ja katkonta: Käynnistyy siitä, kun syöttörullat alkavat pyöriä ja päättyy, kun viimeinen katkaisusahaus on tehty ja pölkky on laskettu maahan.
- Latvan tuonti uralle: Latvuksen siirto väli-alueelta ajouralle.



Kuva 1. Esimerkki poimintahakkuu- (A) ja yläharvennuskoealoista (B) ennen hakkuuta (1) ja hakkuun jälkeen (2).

Figure 1. An example of selection cutting (A) and thinning from above sample plots (B) before (1) and after (2) cutting.



Kuva 2. Tutkimushakkuu tehtiin maaliskuussa 2019 turvekankaalla, joka on uudisojitettu vuonna 1963. Metsiköstä oli harvennettu koivua vuonna 1978. Vuonna 1999 se harvennettiin kauttaaltaan alikasvosta säästäten ja kunnostusojitettiin. *Figure 2. Harvesting experiment in March 2019 in a peatland forest drained in 1963. Most birches were removed during thinning in 1978. In 1999, the entire area was thinned, avoiding damage to the undergrowth, and ditch network maintenance was conducted (Tuulimuri = wind barrier (untreated zone), Pienaukko = gap cutting, Paiminta = selection cutting, Yläharvennus = thinning from above).*

Apuaika

- Hakkuulaitteen tuonti eteen: Hakkuulaitteen tuonti koneen eteen siirtymistä varten.
- Ajo eteen, taakse tai sivulle: Eri suunnissa tapahtuva siirtyminen työpisteiden välillä. Hakkuukoneen liikkuminen jonkin toisen työvaiheen aikana sisällytettiin ko. työvaiheeseen.
- Pienpuuston raivaus: Hakkuuta haittaavan alikasvoksen poisto.
- Puutavaran järjestely.
- Hakkuutähteiden siirtely.

Keskeytykset

Alle 100 sekunnin keskeytykset

Työvaiheista muodostettiin kullekin puuyksilölle yksiselitteisesti kohdistuva rungon käsittelyaika (päätyöaika) ja niille kohdistumaton aputyöaika, jotka yhteenlaskettuna vastaavat perinteisen

metsätyöntutkimuksen tehoaikaa (Haaralaa ym. 1984). Työajan allokointi puutasolle on esitetty mallituksen kuvauksen yhteydessä.

Tässä tutkimuksessa korjuukustannusten laskennassa käytetty hakkuun ajanmenekki-malli sisältää myös alle 100 sekunnin keskeytykset, koska kustannuslaskentaa varten tehty teho- ja käyttöajan välinen muunnos perustuu metsäkoneiden pitkäaikaissuurannan laajaan ajanmenekkiaineistoon (Jylhä ym. 2019). Siinä minimisuodatusaikoja lyhyempiä keskeytyksiä ei voida erottaa varsinaisesta tehoajasta (Skogforsk 2012). Ellei toisin mainita, hakkuun ajanmenekkeillä tarkoitetaan tässä tutkimuksessa tätä alle 100 s:n keskeytykset sisältävää kokonaisaikaa.

Puustotiedot

Hakkuukoneen tietojärjestelmästä otettiin kertymäraportit korjuulohkoittain sekä stm-tiedosto, joka sisälsi hakattujen puiden runko- ja pölkkytiedot (puulajin, läpimittaprofilin 10 cm

Taulukko 1. Tutkimuksessa hakattujen puiden lukumäärä sekä keskimääräiset rinnankorkeusläpimitat ja käyttöosan keskitilavuudet aikatutkimuslohkoittain ja puulajeittain (Mä = mänty, Ku = kuusi, Ko = koivu).

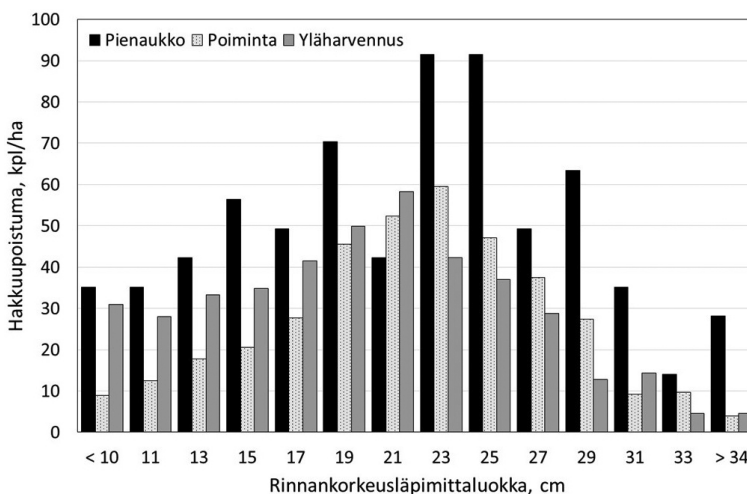
Table 1. Number of stems, mean breast height diameter, and mean merchantable stem volume of the trees cut in the experiment by harvesting block (Pienaukko = gap cutting, Yläharvennus = thinning from above, Poimintahakkuu = selection cutting, Kaikki puut = all trees).

Korjuulohko Harvesting block	Puiden lukumäärä Number of stems				Keskiläpimita Mean diameter, cm				Käyttöosan keskitilavuus Mean merchantable volume, dm ³			
	Mä Pine	Ku Spruce	Ko Birch	Kaikki All	Mä Pine	Ku Spruce	Ko Birch	Kaikki All	Mä Pine	Ku Spruce	Ko Birch	Kaikki All
Pienaukko	24	61	15	100	26	21	21	22	522	314	289	360
Yläharvennus 1	159	121	86	366	20	16	17	18	302	174	184	232
Yläharvennus 2	62	86	43	191	26	21	20	22	536	356	282	398
Poimintahakkuu 1	256	25	83	368	23	20	20	22	399	296	266	364
Poimintahakkuu 2	174	55	91	320	23	16	20	21	411	131	256	453
Poimintahakkuu 3	91	66	98	255	26	21	23	23	572	394	382	543
Kaikki puut	766	414	418	1600	23	19	20	21	417	269	277	343

välein sekä pölkkyjen latvaläpimitat, pituudet ja tilavuudet). Poistettujen puiden rinnankorkeusläpimitan määrittämisessä kannon korkeudeksi oletettiin metsäkoneiden tietojärjestelmästandardin mukaisesti 10 cm (Skogforsk 2012). Haarapuut tai käsittelyssä katkenneet rungot tunnistettiin, ja stm-tiedostossa erikseen käsitellyt latvaosat yhdistettiin päärunkoon ja sen käsittelyaikaan. Yhdistäminen vähensi stm-tiedoston runkomää-

rää 9 %, eikä puulajien välillä ollut eroa. Useasta latvaosasta yhdistettyjen haarapuiden osuus oli hieskoivulla 7,9 %, kuusella 2,4 % ja männyllä 1,2 %. Siten havupuille oli tyypillisempää, että prosessointi keskeytyi jonkin runkovian takia, mutta latvaosa käsiteltiin yhtenä kappaleena.

Tutkimuksessa hakattiin yhteensä 1600 runkoa (Taulukko 1). Hakattujen ainespuumittaisten puiden keskimääräiset läpimittajakaumat



Kuva 3. Poistettujen puiden keskimääräiset läpimittajakaumat hakkuutavoittain.

Figure 3. Mean breast height diameter class distributions (trees/ha) of removal by cutting treatment (Hakkuupoistuma = removal, trees/ha, Rinnankorkeusläpimittaluokka = breast height diameter class, cm; Pienaukko = gap cutting, Poimintahakkuu = selection cutting, Yläharvennus = thinning from above).

Taulukko 2. Hakkuulohkojen lähtöpuuston ja korjatun puuston runkoluvut (kpl/ha) ja ainespuutilavuudet (m³/ha) puulajeittain. (Mä = mänty, Ku = kuusi, Ko = koivu).

Table 2. Number of stems per hectare and commercial timber volume of the initial stand and removal by harvesting block and tree species (Mä = Scots pine, Ku = Norway spruce, Ko = downy birch, Raivauspuut = cleared trees, Yht. = total; Pienaukko = gap cutting, Yläharvennus = thinning from above, Poimintahakkuu = selection cutting, Kaikki lohkot = all blocks).

	Runkoluku, kpl/ha No. of stems /ha				Ainespuutilavuus, m ³ /ha Merchantable volume, m ³ /ha				
	Mä	Ku	Ko	Raivauspuut	Yht.	Mä	Ku	Ko	Yht.
Lähtöpuusto Initial stand									
Pienaukko	162	500	113		775	88	134	31	253
Yläharvennus 1	298	822	144		1264	104	58	30	192
Yläharvennus 2	220	811	125		1156	108	92	35	234
Poimintahakkuu 1	349	1075	134		1558	136	38	32	205
Poimintahakkuu 2	249	1052	131		1433	97	36	30	164
Poimintahakkuu 3	167	1098	159		1425	83	63	54	200
Kaikki lohkot*	259	967	137		1365	105	57	36	198
Hakkuupoistuma Removal									
Pienaukko	162	430	113	70	775	88	134	31	253
Yläharvennus 1	198	155	104	61	517	60	26	19	105
Yläharvennus 2	120	163	85	41	410	64	60	24	147
Poimintahakkuu 1	305	29	106	106	546	122	10	28	160
Poimintahakkuu 2	205	64	103	49	421	83	8	27	118
Poimintahakkuu 3	123	88	131	70	413	70	35	51	155
Kaikki lohkot*	198	105	107	68	478	82	28	30	140

*Lohkojen pinta-aloilla painotetut runkoluvut ja tilavuudet

*Weighted by block areas

hakkuutavoittain on esitetty kuvassa 3. Poiminta- ja yläharvennuslohkoille hakkuun jälkeen jäänyt puusto selvitetiin mittaamalla kahdeksan 500 m²:n ympyräkoelaa, jotka sijoitettiin hakkuulohkoille niiden pinta-alojen suhteessa. Lähtöpuuston tunnusluvut laskettiin stm-aineiston ja em. koelamittauksen tulosten perusteella. Lähtöpuuston ja hakkuupoistuman hehtaarikohdaiset runkoluvut ja ainespuutilavuudet on esitetty taulukossa 2. Keskimääräinen tukkiosuus oli männyllä 57 %, kuusella 45 % ja koivulla 6 % hakatusta ainespuutilavuudesta. Pienaukolla tukkiosuus oli 47 %, poimintahakkuilla 45 % ja yläharvennuksilla 40 %.

Hakkuun ajanmenekin mallinnus

Hakkuun ajanmenekki mallinnettiin lineaarisella sekamallilla (Mixed Linear in IBM SPSS Statistics Version 27, IBM Corp 2020). Sillä voidaan

huomioida aineiston hierarkkinen rakenne, jossa selittäviä tekijöitä on usealla tasolla (tässä tutkimuksessa puuyksilö, puulaji, hakkuulohko ja hakkuupäivä). Puukohtaisen ajanmenekin (min/puu) malli oli seuraavanlainen:

$$\begin{aligned}
 Y_{ijkl} = & \beta_0 + \beta_1 \text{Hakkuutapaj} + \beta_2 \text{Puulajijk} + \beta_3 * X_{ijkl} \\
 & + \beta_4 * f(X_{ijkl}) + \beta_5 * (\text{Hakkuutapaj} * X_{ijkl}) \\
 & + \beta_6 * (\text{Puulajij} * X_{ijkl}) + \beta_7 * (\text{Puulajij} * f(X_{ijkl})) \\
 & + \beta \text{Haaraijkl} + \mu_i + \varepsilon_{ijkl}
 \end{aligned} \quad (1)$$

jossa:

Y_{ijkl} = Ajanmenekki (min/puu) hakkuupäivänä i hakkuutavalla j puulajilla k puulla l (tai sen muunnos)

β_0 = Vakiotermi

β_1 = Hakkuutavan kiinteä vaikutus tasolla j (referenssinä yläharvennus)

$\beta_2, \beta_5, \beta_6$ = Puulajin kiinteät vaikutukset tasolla k

	(referenssinä hieskoivu)
X_{ijkl}	= Puun kokoa kuvaava tunnus, rinnan- korkeusläpimitta (cm) tai ainespuusaan- to (m^3) hakkuukoneelta
f	= Muunnosfunktio puun kokoa kuvaava- valle tunnukselle
x	= Kahden muuttujan yhdysvaikutusta kuvaava merkintä
β_3, β_4	= Puun kokoa kuvaavan tunnuksen kertoimet tasolla l
β_{Haara}	= Haaraisen puun vaikutus
μ_i	= Hakkuupäivän satunnaisvaikutus
ε_{ijkl}	= Satunnaisvirhe

Malli hakkuun tehoajanmenekille tehtiin runkokohtaisten päätyöaikojen ja niille allokoitujen aputyöaikojen perusteella. Ensin mallinnettiin suoraan puulle kohdistuva päätyöaika. Puulle kohdistumaton apuaika laskettiin yhteen hakkuulohkoittain ja kohdistettiin kunkin lohkon erikokoisille puille em. mallilla lasketujen puukohtaisten päätyöaikojen suhteessa. Suoraan malliin perustuva apuajan allokointi kuitenkin pienentäisi kokonaisajan (päätyöaika + apuaika) suhteellista vaihtelua, mistä syystä päätyöajan satunnaisvaihtelu (residuaalit) huomioitiin allokoinnissa lukuun ottamatta puun haaraisuuden aiheuttamia isoja poikkeamia.

Korjuukustannusten laskenta

Korjuun kustannukset saatiin jakamalla hakkuun ja metsäkuljetuksen käyttötuntikustannukset vastaavilla käyttötuntituottavuuksilla. Käyttötunti (E_{15-h}) sisältää tehoajan lisäksi alle 15 minuutin keskeytykset (Jylhä ym. 2019). Hakkuun käyttötuntikustannukseksi oletettiin 136 € ja metsäkuljetuksen 93 €. Ne perustuvat Väätäisen ym. (2021) laskelmiin, jotka päivitettiin elokuun 2022 tasoon metsäalan kone- ja autokustannusindekseillä (Tilastokeskus 2022).

Hakkuun ajanmenekit laskettiin tässä tutkimuksessa laaditulla puukohtaisella mallilla 2, joka sisältää myös alle 100 s:n keskeytykset. Nämä ajanmenekit muunnettiin käyttöajanmenekeiksi kertoimella 1,1 (Jylhä ym. 2019).

Metsäkuljetuksen tehoajanmenekin laskentaan käytettiin Mannerin ym. (2013) julkai-

semia malleja ja keskiarvoja. Niillä voidaan laskea tuottavuuksia niissäkin tapauksissa, kun eri puutavaralajeja ajetaan yhdistelmäkuormina. Koko koeleimikolla ja eri hakkuutavoilla keskimääräinen tyhjänäajomatka oli 300 m ja kuormattuna-ajomatka 200 m. Vastaaviksi ajonopeuksiksi oletettiin tyhjänäajossa 3,4 km/h ja kuormattuna-ajossa 2,9 km/h (Manner ym. 2016). Metsäkuljetuksen tehoajanmenekit muunnettiin käyttöajanmenekeiksi kertoimella 1,2 (Laitila 2008). Laskelmissa tarkasteltiin myös kuormakoon vaikutusta metsäkuljetuksen tuottavuuteen ja kustannuksiin, koska suometsissä heikko kantavuus rajoittaa usein kuorman kokoa. Ensimmäisessä laskentavaihtoehdossa kaikki puutavara oletettiin ajettavaksi 8 m^3 :n kuormina. Toisessa vaihtoehdossa kantavuus oletettiin hyväksi, jolloin havupuutukit ajettiin 12 m^3 :n kuormissa. Puutavaralajikohtaiset metsäkuljetuskustannukset allokoitiin erikokoisille puille suhteutettuna niiden puutavaralajikoostumukseen, jotka laskettiin puulajeittain 1 cm:n läpimittaluokissa käyttäen liukuvaa keskiarvoa 3 cm:n luokissa.

Tulokset

Ajanmenekit työvaiheittain

Keskimääräinen, alle 100 s:n keskeytykset sisältävä työaika puuta kohden oli suurin poimintahakkuussa (41,2 s) ja pienin pienaukkohakkuussa (29,1 s) (Taulukko 3). Suoraan puuhun kohdistettavissa olevan päätyöajan (kouran vienti puulle, kaato ja mahdollinen rungon siirto, karsinta ja katkonta, latvan tuonti uralle) erot hakkuutapojen välillä olivat melko pienet. Pienaukkohakkuun kaikki työvaiheet olivat kuitenkin latvan siirtoa lukuun ottamatta joutuisampia kuin muilla hakkuutavoilla. Erityisesti siirtymisiin kului puuta kohti huomattavasti vähemmän aikaa kuin muilla lohkoilla (Taulukko 3).

Ajanmenekki oli pienaukkohakkuussa 1,0–1,5 min/m^3 , poimintahakkuussa 1,7–2,1 min/m^3 ja yläharvennuksessa 1,9–2,6 min/m^3 (Kuva 4). Männyllä ajanmenekki oli pienin kaikilla hakkuutavoilla ja koivulla suurin. Karsintaan ja katkontaan kuutiometriä kohden kulunut aika ei juuri vaihdellut hakkuutapojen välillä, mutta niiden

Taulukko 3. Hakkuun työvaiheiden keskimääräiset ajanmenekit puuta kohti (s) ja osuudet työajasta (%) hakkuutavoittain.

Table 3. Mean consumption of the cutting phases (s/tree) and their proportions (%) of the working time by cutting method.

		Pienaukkohakkuu Gap cutting		Poimintahakkuu Selection cutting		Yläharvennus Thinning from above	
		s/puu s/tree	% työ- ajasta % of work time	s/puu s/tree	% työ- ajasta % of work time	s/puu s/tree	% työ- ajasta % of work time
Päätyöaika Main work time	Kouran vienti puulle Extend the boom and grasp	2,5	8,4	3,0	7,3	3,1	8,4
	Kaato ja rungon siirto Felling and moving the stem	7,3	25,1	9,1	22,2	8,6	23,2
	Karsinta ja katkonta Delimiting and cross-cutting	14,3	49,0	16,6	40,3	14,1	38,0
	Latvan tuonti uralle Moving the top to the strip road	1,3	4,4	0,7	1,6	0,9	2,4
Aputyöaika Auxiliary work time	Hakkuulaitteen tuonti eteen Positioning the boom forward	0,4	1,3	1,55	3,7	1,1	2,9
	Ajo eteen, taakse tai sivulle Moving	1,8	6,2	7,3	17,7	6,9	18,6
	Pienpuuston raivaus Clearing undergrowth	0,4	1,2	0,6	1,5	0,4	1,2
	Puutavaran järjestely Sorting timber	0,2	0,5	0,5	1,3	0,6	1,7
	Hakkuutähteiden siirtely Moving tops and branches	0,0	0,0	0,1	0,3	0,2	0,4
	Keskeytykset < 100 s	Delays < 100 s	1,1	3,8	1,7	4,2	1,2
Yhteensä Total		29,1	100,0	41,2	100	37,0	100,0

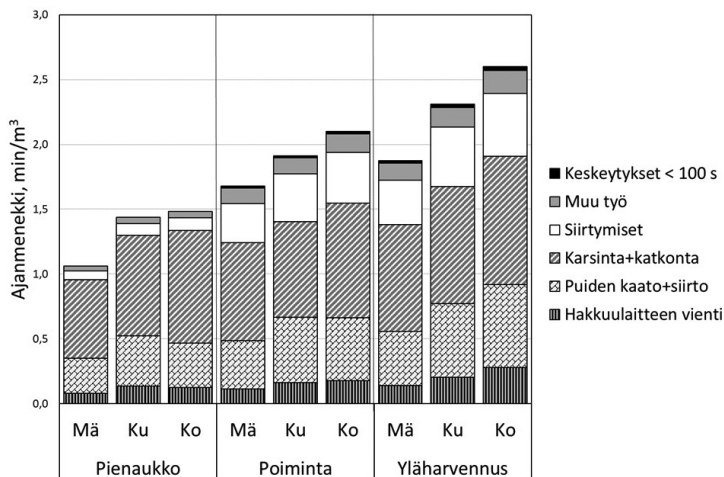
Kuva 4. Ajanmenekki ainespuukuutiometriä kohden (min/m^3) työvaiheittain.

Figure 4. Time consumption of cutting by work phase (Ajanmenekki, min per m^3 of merchantable volume; Pienaukko = gap cutting, Poiminta = selection cutting, Yläharvennus = thinning from above; Mä = pine, Ku = spruce, Ko = birch; Keskeytykset < 100 s = delays < 100 s, Muu työ = other work, Siirtymiset = moving, Karsinta + katkonta = delimiting and cross-cutting, Puiden kaato + siirto = felling and moving trees, Hakkuulaitteen vienti = extending the boom and grasp).

Taulukko 4. Suoraan puulle kohdistuvien päätyöaikojen (s/puu) ja rungon koon väliset korrelaatiokertoimet (Spearman) hakkuutavoittain.

Table 4. Spearman correlation coefficients between the stem size and time consumption (s/tree) of the main cutting phases.

Kokotunnus Size parameter	Hakkuutapa Cutting method	Hakkuulaitteen vienti puulle Extend the boom and grasp	Kaato ja rungon siirto Felling and moving the stem	Karsinta ja katkenta Delimiting and cross-cutting	Latvan tuonti uralle Moving the top to the strip road
Puun rinnan korkeusläpimitta Breast height diameter	Pienaukkohakkuu Gap cutting	0,085	0,539*	0,812*	-0,002
	Poimintahakkuu Selection cutting	-0,009	0,337*	0,722*	0,159 ○
	Yläharvennus Thinning from above	0,033	0,388*	0,845*	0,284*
Rungon käyttöosan tilavuus Merchantable stem volume	Pienaukkohakkuu Gap cutting	0,083	0,534*	0,821*	0,024
	Poimintahakkuu Selection cutting	-0,011	0,356*	0,739*	0,149 ○
	Yläharvennus Thinning from above	0,013	0,397*	0,860*	0,284*

* $p < 0,05$; ○ $p < 0,1$

Taulukko 5. Puutason ajanmenekkimallien selittäjät ja niiden merkitsevyys. Mallit 1 ja 3 kuvaavat päätyöajan menekkiä (min/puu), mallien 2 ja 4 ajanmenekit sisältävät päätyöajan lisäksi apuajat ja alle 100 s:n keskeytykset.

Table 5. Explanatory variables for the tree-level time-consumption models of cutting and their significance. Models 1 and 3 (Malli 1 and 3) describe the time consumption of the main work phases (min/tree), whereas the time consumptions in Models 2 and 4 (Malli 2 and 4) also include auxiliary times and delays less than 100 s. Abbreviations and symbols are listed on page 23 (Varianssi = variance, Keskivirhe = standard error).

	Malli 1 R2* = 0,55		Malli 2 R2* = 0,68		Malli 3 R2* = 0,55		Malli 4 R2* = 0,68	
	F-arvo F-value	p	F-arvo F-value	p	F-arvo F-value	p	F-arvo F-value	p
β_0	4,93	0,027	9,08	0,003	287,68	0,000	276,40	0,000
HT	0,11	0,89	0,06	0,941	10,33	0,000	10,57	0,000
PL	3,83	0,022	5,59	0,004	1,90	0,150	1,96	0,141
$d_{1,3}$ (cm)	45,51	0,000	66,23	0,000				
v (m ³)					26,90	0,000	34,96	0,000
v^2					23,99	0,000	30,29	0,000
$\ln(v+1)$					34,75	0,000	46,11	0,000
$HT \times d_{1,3}$	9,48	0,000	13,35	0,000				
$PL \times d_{1,3}$	9,54	0,000	14,37	0,000				
$PL \times d_{1,3}^2$	9,33	0,000	14,02	0,000				
$PL \times v$					16,78	0,000	9,93	0,000
$PL \times v^2$					0,00	0,000	20,17	0,000
$HT \times \ln(v+1)$					9,00	0,000	8,90	0,000
β_{Haara}	69,30	0,000	116,20	0,000	78,49	0,000	126,39	0,000
Satunnaisvaikutukset Random effects	Varianssi	Keskivirhe	Varianssi	Keskivirhe	Varianssi	Keskivirhe	Varianssi	Keskivirhe
μ_i	-	-	0,0005	0,0006	-	-	0,0003	0,0006
ε_{ijkl}	0,0152	0,0005	0,0158	0,0006	0,0150	0,0005	0,0160	0,0006

*Pseudo R-square

suhteellinen osuus tehoajasta oli pienaukkohakkuussa selvästi suurempi kuin muilla hakkuutavoilla (54–59 % vs. 38–45 %). Ajanmenekkien erot hakkuutapojen välillä selittyivät lähinnä siirtymisaikojen ja muiden puille kohdistumattomien apuaikojen eroilla. Niiden osuus oli pienaukkohakkuussa vain 9 % tehoajasta, kun muilla hakkuutavoilla se oli 26–28 %.

Ajanmenekkimallit

Puukohtaisen mallituksen perustaksi tarkasteltiin päätyöaikojen korrelointia puun koon kanssa (Taulukko 4). Kaadon sekä karsinnan ja katkonnan ajanmenekki suureni merkitsevästi ($p < 0,05$) runkokoon lisääntyessä. Merkitsevä positiivinen korrelaatio havaittiin myös latvuksen uralletuonin ajanmenekissä yläharvennuksilla. Myös poimintahakkuussa rungon koon kasvu näytti

lisäävän latvuksen uralletuonin ajanmenekkiä ($p < 0,1$).

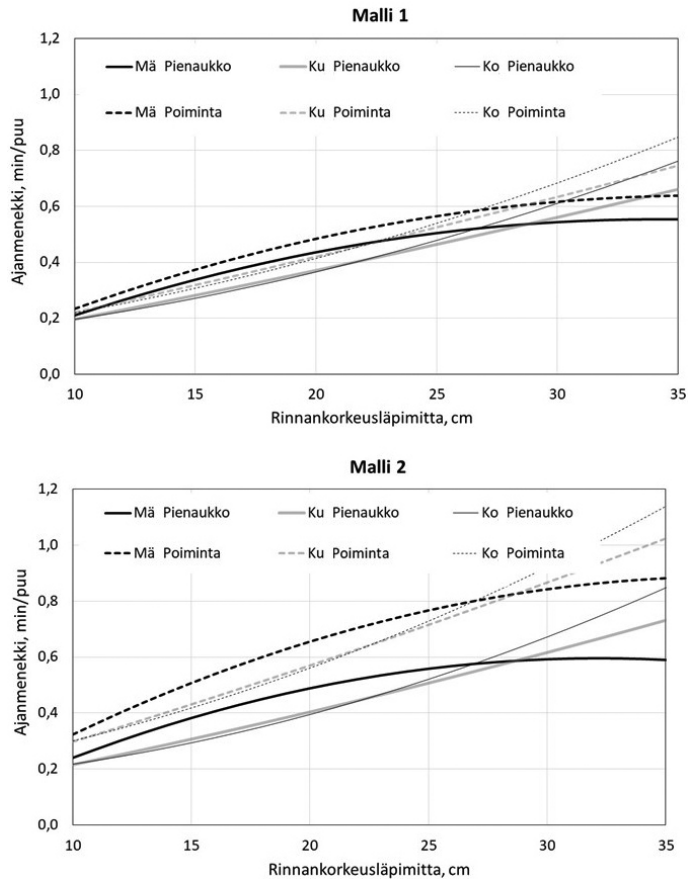
Puutason ajanmenekille (min / puu) tehtiin neljä mallia. Selitettävänä muuttujana niissä oli suoraan puun hakkuuseen kohdistuva päätyöaika (mallit 1 ja 3) tai puutasolle allokoitu kokonais työaika, joka sisältää päätyöaikojen lisäksi myös apuajat ja alle 100 s:n keskeytykset (mallit 2 ja 4). Malleissa 1 ja 2 puun kokoa kuvaavana selittäjänä oli kuorellinen rinnankorkeusläpimitta ($d_{1,3}$, cm) (Taulukot 5–6, Kuva 5). Malleissa 3 ja 4 puun kokoa kuvaava tunnus oli rungon käyttöosan tilavuus (v , m^3), joka oli tukki-, pikkutukki ja kuitupuupölkkyjen tilavuuksien summa (Taulukot 5 ja 7, Kuva 6).

Puun rinnankorkeusläpimitan, käyttöosan tilavuuden ja hakkuutavan (HT) yhdysvaikutukset tutkittiin, ja tilastollisesti merkitsevät yhdysvaikutukset sisällytettiin malleihin.

Taulukko 6. Rinnankorkeusläpimitaan ($d_{1,3}$, cm) perustuvat puutason ajanmenekkimallit. Malli 1 kuvaa päätyöajan menekkiä ja malli 2 päätyöajan, apuajat ja alle 100 s:n keskeytykset sisältävää aikaa (min/puu).

Table 6. Tree-level time-consumption models of cutting based on breast height diameter ($d_{1,3}$, cm). Model 1 (Malli 1) describes the time consumption of the primary work time, whereas Model 2 (Malli 2) also includes the auxiliary time and delays shorter than 100 s (min/tree) (Mänty = pine, Kuusi = spruce, Koivu = birch, Pienaukko = gap cutting, Poiminta = selection cutting, Yläharvennus = thinning from above, Haara = forked stem).

Kiinteät vaikutukset <i>Fixed effects</i>	Malli 1				Malli 2			
	Kerroin <i>Coefficient</i>	Keski- virhe <i>Standard error</i>	t-arvo <i>t-value</i>	p	Kerroin <i>Coefficient</i>	Keski- virhe <i>Standard error</i>	t-arvo <i>t-value</i>	p
β_0	0,104	0,0574	1,80	0,08	0,139	0,0610	2,28	0,02
Mänty	-0,236	0,0870	-2,71	0,07	-0,2936	0,0891	-3,30	0,00
Kuusi	-0,068	0,0717	-0,94	0,36	-0,0920	0,0740	-1,25	0,21
Koivu	0				0			
Pienaukko	0,013	0,045	0,29	0,78	0,016	0,047	0,34	0,73
Poiminta	-0,006	0,024	-0,26	0,79	0,005	0,025	0,18	0,85
Yläharvennus	0							
$d_{1,3}$	0,009	0,0059	1,43	0,15	0,0127	0,0061	2,08	0,04
Pienaukko $\times d_{1,3}$	-0,0030	0,0020	-1,75	0,08	-0,011	0,0006	-5,16	0,00
Poiminta $\times d_{1,3}$	-0,0004	0,0010	-0,22	0,82	-0,0020	0,0010	-1,55	0,12
Yläharv. $\times d_{1,3}$	0				0			
Mänty $\times d_{1,3}$	0,0348	0,0083	4,18	0,00	0,0439	0,0085	5,15	0,00
Kuusi $\times d_{1,3}$	0,0097	0,0074	1,32	0,19	0,0125	0,0076	1,68	0,09
Koivu $\times d_{1,3}$	0				0			
Mänty $\times d_{1,3}^2$	-0,0006	0,0001	-4,55	0,00	-0,0007	0,0010	-5,38	0,00
Kuusi $\times d_{1,3}^2$	0,0001	0,0001	0,67	0,50	0,0001	0,0001	1,15	0,25
Koivu $\times d_{1,3}^2$	0,0004	0,0001	2,50	0,01	0,0005	0,0002	3,28	0,00
β_{Haara}	0,1520	0,0183	8,32	0,00	0,2028	0,0188	10,78	0,00

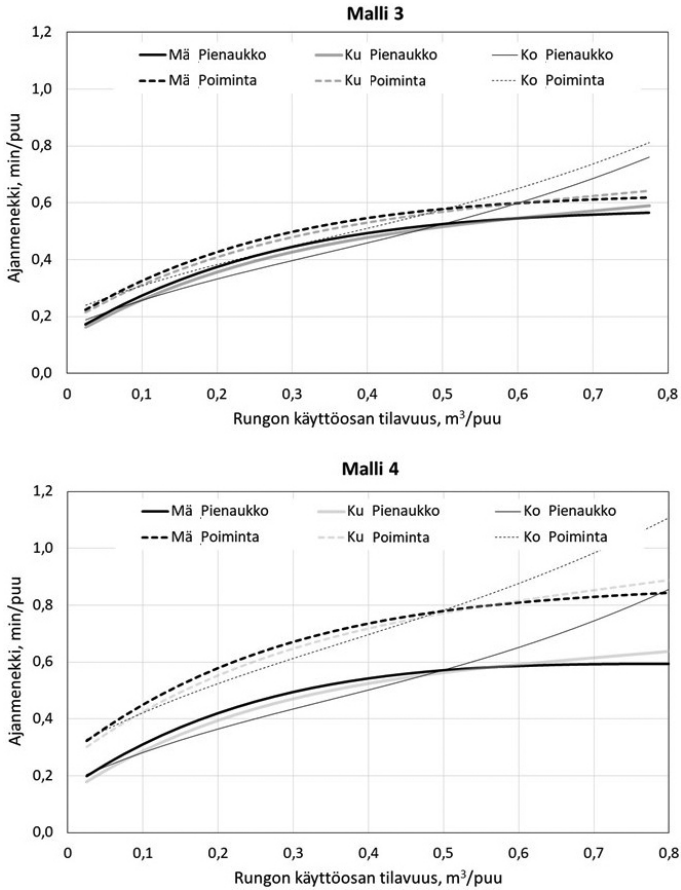


Kuva 5. Rinnankorkeusläpimitan vaikutus puun hakkuun ajanmenekkiin puulajeittain suometsän pienaukko- ja poimintahakkuussa. Malli 1 sisältää päätyöajat ja malli 2 päätyöajan lisäksi aputyöajat ja alle 100 s:n keskeytykset.

Figure 5. Effect of breast height diameter (Rinnankorkeusläpimitta, cm) on the time consumption (Ajanmenekki, min/tree) of the gap and selection cutting of a peatland forest by tree species. Model 1 (Malli 1) contains the main work time, and Model 2 (Malli 2) also includes the auxiliary time and delays shorter than 100 s (Mä Pienaukko = pine, gap cutting, Ku Pienaukko = spruce, gap cutting, Ko Pienaukko = birch, gap cutting, Mä Poiminta = pine, selection cutting, Ku Poiminta = spruce, selection cutting, Ko Poiminta = birch, selection cutting).

Puulajien väliset erot hakkuun ajanmenekissä olivat suuremmat, kun selittäjänä oli rungon käyttöosan tilavuuden asemesta rinnankorkeusläpimitta (Kuvat 5 ja 6). Pienen, rinnankorkeusläpimitaltaan 10 cm puun hakkuussa kului puulajista riippumatta aikaa pienaukko- ja poimintahakkuussa 0,2 min ja poimintahakkuussa 0,3 min (sis. alle 100 s:n keskeytykset). Pientä tukkikokoa vastaavien,

15–20 cm läpimittaisten mäntyjen hakkuuseen kului enemmän aikaa kuin vastaavan kokoisten kuusten tai koivujen. Suuremmilla, läpimitaltaan 28 cm puilla hakkuun ajanmenekki oli puulajista riippumatta pienaukko- ja poimintahakkuussa noin 0,6 minuuttia ja muilla hakkutavoilla noin 0,8 minuuttia. Kookkaiden mäntyjen hakkuuaika ei enää juuri lisääntynyt, kun rinnankorkeusläpimitta ylitti



Kuva 6. Käyttöosan tilavuuden vaikutus puun hakkuun ajanmenekkiin suomensän pienaukko- ja poimintahakkuussa. Malli 3 sisältää päätyöajan ja malli 4 päätyöajan lisäksi aputyöajat ja alle 100 s:n keskeytykset.

Figure 6. Effect of the merchantable stem volume (Rungon käyttöosan tilavuus, m³ per tree) on the time consumption (Ajanmenekki, min/tree) of the gap and selection cutting of a peatland forest by tree species. Model 3 (Malli 3) contains the main work time, and Model 4 (Malli 4) also includes the auxiliary time and delays shorter than 100 s (Mä Pienaukko = pine, gap cutting, Ku Pienaukko = spruce, gap cutting, Ko Pienaukko = birch, gap cutting, Mä Poiminta = pine, selection cutting, Ku Poiminta = spruce, selection cutting, Ko Poiminta = birch, selection cutting).

25 cm:n. Sen sijaan koivun läpimitan suureneminen lisäsi hakkuun ajanmenekkiä huomattavasti. Kuusen hakkuun ajanmenekki kasvoi jokseenkin suoraviivaisesti läpimitan lisääntyessä. Kuusen ja koivun hakkuuaikojen ero ei ollut kuitenkaan tilastollisesti merkitsevä. Poimintahakkuussa puukohtainen ajanmenekki oli keskimäärin 40 % ja yläharvennuksessa 47 % pienaukkohakkuuta

suurempi. Yläharvennuksen keskimääräinen puukohtainen ajanmenekki oli noin 5,5 % ($p = 0,000$) suurempi kuin poimintahakkuun.

Hakkuun ajanmenekin riippuvuus puun käyttöosan tilavuudesta oli männyllä ja kuusella lähes samanlainen. Ajanmenekki lisääntyi noin 0,5 m³:n tilavuuteen saakka, mutta enää hyvin vähän sitä suuremmilla puilla (Kuva 6). Koi-

Taulukko 7. Rungon käyttöosan tilavuuteen (v , m^3) perustuvat puutason ajanmenekkimallit. Malli 3 kuvaa päätyöajan menekkiä ja malli 4 päätyöajan, apuajat ja alle 100 s:n keskeytykset sisältävää aikaa (min/puu).

Table 7. Tree-level time-consumption models for cutting based on merchantable stem volume. Model 3 (Malli 3) describes the consumption of the main work time, whereas Model 4 (Malli 4) also includes the auxiliary time and delays shorter than 100 s (Mänty = pine, Kuusi = spruce, Koivu = birch, Pienaukko = gap cutting, Poiminta = selection cutting, Yläharvennus = thinning from above, Haara = forked stem).

Kiinteät vaikutukset <i>Fixed effects</i>	Malli 3				Malli 4			
	Kerroin <i>Coefficient</i>	Keski- virhe <i>Standard error</i>	t-arvo <i>t-value</i>	<i>p</i>	Kerroin <i>Coefficient</i>	Keski- virhe <i>Standard error</i>	t-arvo <i>t-value</i>	<i>p</i>
β_0	0,2234	0,0167	13,38	0,00	0,2947	0,0215	13,71	0,00
Mänty	-0,0616	0,0136	-4,54	0,00	-0,1194	0,0270	-4,43	0,00
Kuusi	-0,0095	0,0069	-1,38	0,17	-0,0018	0,0137	-0,13	0,90
Koivu	0				0			
Pienaukko	-0,0296	0,0249	-1,19	0,23	-0,0205	0,0258	-0,79	0,43
Poiminta	-0,0374	0,0192	-1,95	0,05	-0,0389	0,0200	-1,94	0,05
Yläharvennus	0				0			
v (m^3)	-6,3077	1,1876	-5,31	0,00	-7,4108	1,2289	-6,03	0,00
v^2	2,0679	0,3679	5,62	0,00	2,3845	0,3806	6,26	0,00
$\ln(v+1)$	7,3982	1,2549	5,90	0,00	8,9738	1,2981	6,91	0,00
Mänty $\times v$	0,5594	0,1360	4,11	0,00	-0,3267	0,0796	-4,10	0,00
Kuusi $\times v$	0,4783	0,1268	3,77	0,00	-0,0993	0,0442	-2,25	0,02
Koivu $\times v$	0				0			
Mänty $\times v^2$	-0,9970	0,1722	-5,79	0,00	0,6040	0,1411	4,28	0,00
Kuusi $\times v^2$	-0,8373	0,1705	-4,91	0,00	0,5284	0,1316	4,01	0,00
Koivu $\times v^2$	0				0			
β_{Haara}	0,1597	0,0180	8,86	0,00	0,2106	0,0187	11,24	0,00

vulla ajanmenekki riippui lähes suoraviivaisesti käyttöosan tilavuudesta. Se oli keskikokoisilla ($0,15\text{ m}^3\text{--}0,40\text{ m}^3$) koivuilla havupuuta pienempi ja sitä kookkaammilla puilla ($v > 0,50\text{ m}^3$) suurempi kuin havupuilla.

Pienaukkohakkuussa suoraan yksittäiselle puulle kohdistuvan käsittelyajan osuus työajasta oli puulajista riippuen 88–95 %, poimintahakkuussa vastaavat osuudet olivat 70–75 % ja yläharvennuksessa 68–73 %.

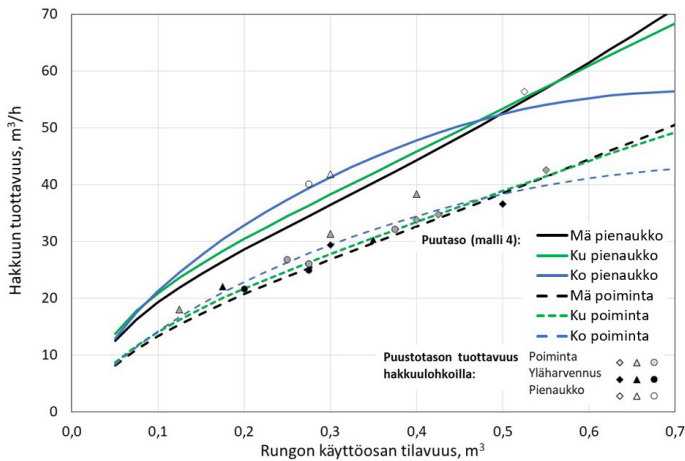
Hakkuun tuottavuus

Hakkuun tuottavuutta tarkastellaan perinteisesti puustotasolla rungon keskitilavuuden funktiona. Kuvassa 7 on verrattu hakkuulohkojen puustotasoon tuottavuuksia puutason mallilla 4 laskettuun tuottavuuteen. Pienaukkohakkuussa samalle runkokoolle saatiin puustotasolla käyttöosan keskitilavuuden perusteella hieman korkeampia tuottavuuksia kuin puutason mallilla. Keskitilavuuteen

perustuva tarkastelu johti kuusella 9 %, männyillä 3 % ja koivuilla 2 % suurempaan tuottavuuteen kuin puutason malli. Myös poimintahakkuissa ja yläharvennuksessa käyttöosan keskitilavuuteen perustuva tarkastelu johti kuusella 9 % korkeampaan tuottavuuteen kuin vastaava puutason malli. Koivuilla ja männyillä erot olivat pienet, eikä systemaattista eroa havaittu. Systemaattinen ero kuusilla johtui niiden hakkuupoistuman oikealle vinosta kokojakaumasta, joka painottui pieniin läpimittoihin ($d_{1,3} < 9\text{ cm}$) mutta sisälsi toisaalta läpimitaltaan yli 30 cm:n puita enemmän kuin männyn ja koivun läpimitajakaumat. Hakattujen mäntyjen ja koivujen koko oli lähempänä normaalijakaumaa.

Metsäkuljetuksen tuottavuus

Tutkitussa leimikossa tehtiin yhteensä kahdeksaa puutavaralajia. Muutamien vähemmistöpuutavaralajien kertymät olivat liian pieniä erillisinä kuor-



Kuva 7. Hakkuulohkoilta puulajeittain laskettujen puustotason tuottavuuksien vertailu mallilla 4 pienaukkohakkuulle ja poimintahakkuulle laskettuihin puustotason tuottavuuksiin, kun rungon käyttöosan keskitilavuus puustotasolla on asetettu vastaamaan käyttöosan tilavuutta puustotasolla.

Figure 7. Comparisons of stand-level cutting productivities (m^3/h) calculated for the cutting blocks and tree-level productivities based on Model 4. Mean merchantable stem volumes at the stand level were set to match the tree-level merchantable stem volumes (Rungon käyttöosan tilavuus = merchantable stem volume, m^3 ; Hakkuun tuottavuus = cutting productivity, m^3/h ; Puustaso (malli 4) = tree level, model 4; Mä Pienaukko = pine, gap cutting, Ku Pienaukko = spruce, gap cutting, Ko Pienaukko = birch, gap cutting, Mä Poiminta = pine, selection cutting, Ku Poiminta = spruce, selection cutting, Ko Poiminta = birch, selection cutting; Puustotason tuottavuus hakkuulohkoilla = stand-level productivity at the cutting blocks, Mä = Pine, Ku = spruce, Ko = birch, Poiminta = selection cutting, Yläharvennus = thinning from above, Pienaukko = gap cutting).

mina ajettaviksi. Vertailujen jälkeen todettiin, että vähiten sekakuormia aiheuttava ja tehokkain vaihtoehto oli yhdistää männyn ja kuusen pikkutukit sekä koivutukit samoihin kuormiin (Taulukko 8). Pienten erien yhdistäminen johonkin suurempaan tavaralajierään osoittautui kannattamattomaksi. Se saattaisi myös lisätä purkamistaikaa huomattavasti, koska sekakuormia tulisi paljon. Siksi mäntytukit, kuusitukit sekä kaikki kolme kuitupuulajia laskettiin ajettavan omina kuorminaan.

Leimikkotasolla lasketut puutavaralajien metsäkuljetuskustannukset ($\text{€}/m^3$, Taulukko 8) kohdistettiin erikokoisille puille painottamalla kustannuksia puiden laskennallisilla puutavaralajiosuuksilla (Kuva 8). Hakkuutapa ei vaikuttanut puutavaralajijakaumaan.

Puun koko ei juuri vaikuttanut metsäkuljetuksen tuottavuuteen tutkimusleimikossa, kun maaston heikko kantavuus rajoitti kuormakoon $8 m^3$:iin (Kuva 9). Havupuiden metsäkuljetuksen tuottavuus puustotasolla parani vain vähän rungon järeytyessä, kun tukit ajettiin vajailla kuormilla. Havutukkien kuormakoon kasvattaminen $12 m^3$:iin paransi selvästi metsäkuljetuksen tuottavuutta. Tuottavuus parani männyllä enemmän kuin kuusella, koska mäntytukkien kertymä oli suurempi kuin kuusella. Pikkutukkien kertymä oli pieni, joten niiden teko alensi havupuiden metsäkuljetuksen tuottavuutta läpimitaltaan $15\text{--}20\text{ cm}$:n puilla. Myös koivutukkien kertymä oli pieni, mikä alensi läpimitaltaan yli 24 cm :n koivujen metsäkuljetuksen tuottavuutta.

Taulukko 8. Metsäkuljetuksen kustannusten muodostuminen tutkimusmetsikössä. Hakkuulohkoilta mitatut ajourapituudet olivat: Pienaukkohakkuu (1) 678 m/ha, poimintahakkuu (2) 468 m/ha, yläharvennus (3) 539 m/ha ja koko leimikko (1–3) 438 m/ha. Kuormakoko kaikilla puutava-ralajeilla 8 m³, havutukeilla vaihtoehtoisesti myös 12 m³.

Table 8. Factors affecting the cost of forwarding by cutting method in the experimental stand. Measured strip road lengths by cutting method: gap cutting 678 m/ha, selection cutting 468 m/ha, thinning from above 539 m/ha, and entire stand 438 m³/ha. Load volume = 8 m³ for all timber as-sortments and alternatively 12 m³ for sawlogs.

	Hakkuu- tapa ¹ Cutting method ¹	Mänty- tukki Pine sawlogs	Mänty- kuitu Pine pulpwood	Kuusi- tukki Spruce sawlogs	Kuusi- kuitu Spruce pulpwood	Koivu- kuitu Birch pulpwood	Mä+Ku-parrut +Koivutukit ³ Small-diameter sawlogs + birch veneer logs
Kertymä	1	62	23	60	62	30	3+11+0
Removal	2	53	32	8	8	31	5+1+2
m ³ /ha	3	34	24	16	19	20	4+3+1
	1–3	47	29	13	13	27	5+2+2
Ajouranvarsi- tiheys	1	9,2	3,4	8,9	9,1	4,5	2,1
	2	11,3	6,8	1,7	1,6	6,6	1,8
Log concentration	3	6,2	4,5	3,0	3,5	3,7	1,2
m ³ /100 m	1–3	10,7	6,6	2,9	3,0	6,2	1,8
Tuottavuus							
Productivity	1	17,0/24,2 ²	15,8	17,0/24,1 ²	17,0	16,2	13,9
m ³ /E ₁₅ -h	2	17,4/24,9 ²	16,7	13,7/17,2 ²	13,5	16,3	12,6
	3	16,6/23,2 ²	16,3	15,5/20,5 ²	15,9	16,0	11,7
	1–3	17,3/24,7 ²	16,6	15,4/20,4 ²	15,6	16,6	12,8
Kuljetuskustannus	1	5,5/3,8 ²	5,9	5,5/3,9 ²	5,5	5,7	7,6
Forwarding cost	2	5,3/3,7 ²	5,6	6,8/5,4 ²	6,9	5,6	7,4
€/m ³	3	5,6/4,0 ²	5,7	6,0/4,5 ²	5,9	5,8	7,9
	1–3	5,4/3,8 ²	5,6	6,0/4,7 ²	6,0	5,6	7,3

¹ Hakkuutapa: 1 = Pienaukkohakkuu, 2 = Poimintahakkuu, 3 = Yläharvennus, 1–3: Koko leimikko

² Cutting method: 1 = gap cutting, 2 = selection cutting, 3 = thinning from above, 1–3: experimental stand

³ Tukkien kuormakoko 12 m³

⁴ Sawlog load volume = 12 m³

⁵ Metsäkuljetus sekakuormina

⁶ Forwarding with mixed loads

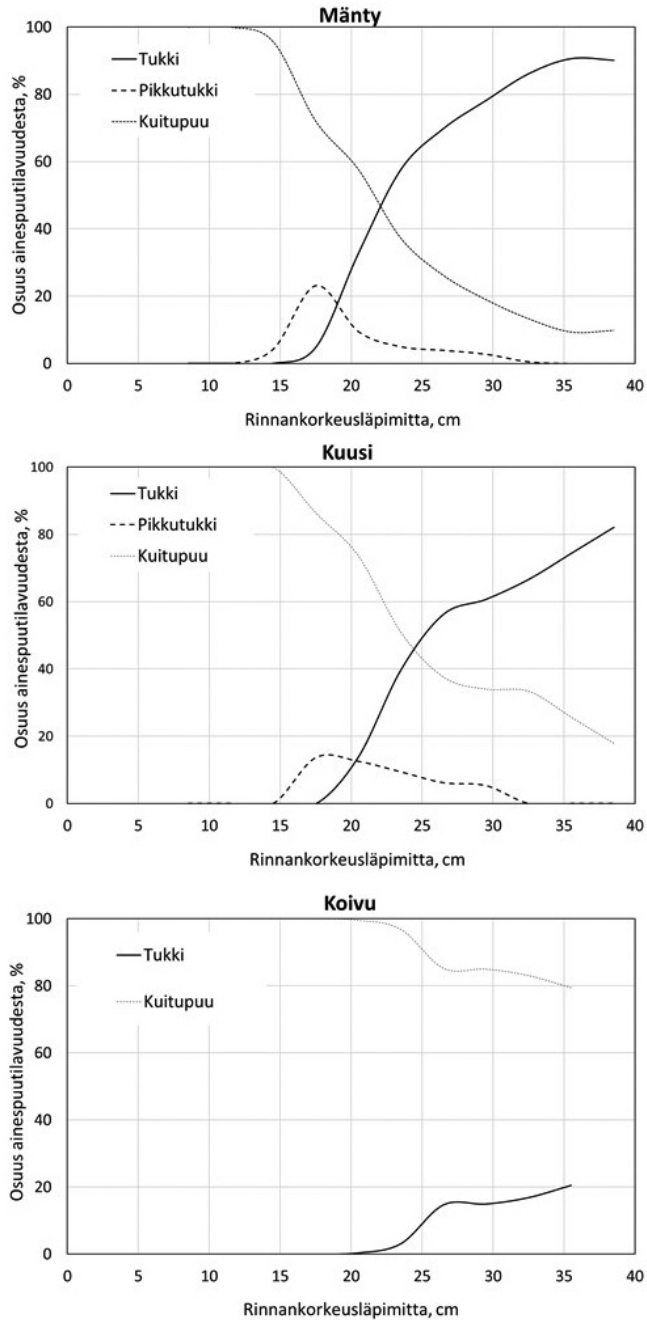
Puunkorjuun kustannukset

Hakkuukustannus poimintahakkuilla oli samankokoisilla puilla puulajista riippumatta keskimäärin 40 % korkeampi kuin pienaukkohakkuussa (Kuva 10), ja poimintahakkuun kustannus oli puolestaan noin 6 % pienempi kuin yläharvennuksen.

Pienten kuusten ja koivujen poimintahakkuun kustannus oli 10 cm:n rinnankorkeusläpimittaluokassa yli 25 €/m³, männyllä hieman alle 20 €/m³ (Kuva 10). Läpimitaltaan 15–16 cm olevien puiden hakkuun yksikkökustannus alitti 10 euron rajan. Kun puun rinnankorkeusläpimitta oli 23 cm, hakkuukustannukset olivat kaikilla puulajeilla samaa luokkaa niin poimintahakkuussa (n. 5 €/m³) kuin pienaukkohakkuussakin (n. 3,5 €/m³). Tätä suuremmilla koivuilla hakkuukustannus pieneni

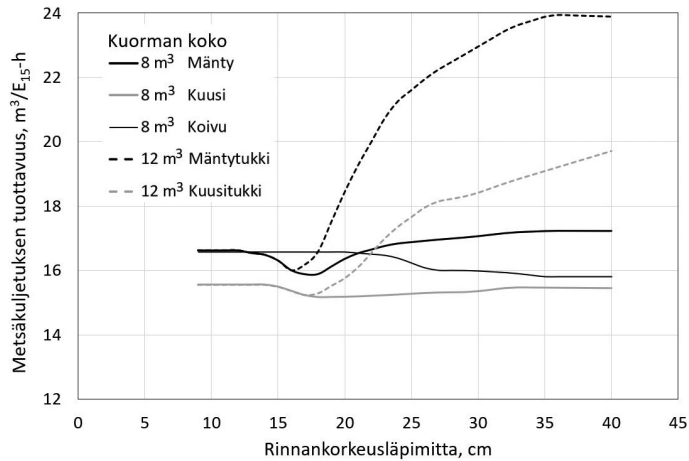
vain vähän, mutta 35 cm läpimittasilla havupuilla hakkuukustannus oli poimintahakkuussa vain 2,5 €/m³, pienaukkohakkuussa alle 2 €/m³.

Puutason korjuukustannus puulajeittain ja hakkuutavoittain saatiin lisäämällä hakkuukustannukseen hakkuutavoittain laskettu metsäkuljetuskustannus, joka perustui kunkin hakkuutavan puutavaralajijakaumaan (Taulukko 8 ja Kuvat 8 ja 9). Samakokoisten puiden korjuukustannusten ero poimintahakkuun ja yläharvennuksen välillä oli pieni (Kuva 11). Puunkorjuun suhteelliset kustannuserot hakkuutapojen välillä supistuiivat runkokoon suuretsa. Korjuukustannus oli pienaukkohakkuulla rinnankorkeusläpimittaan 10 cm:n männyillä noin 20 €/m³, kuusella ja koivulla lähes 24 €/m³. Vastaavankokoisten



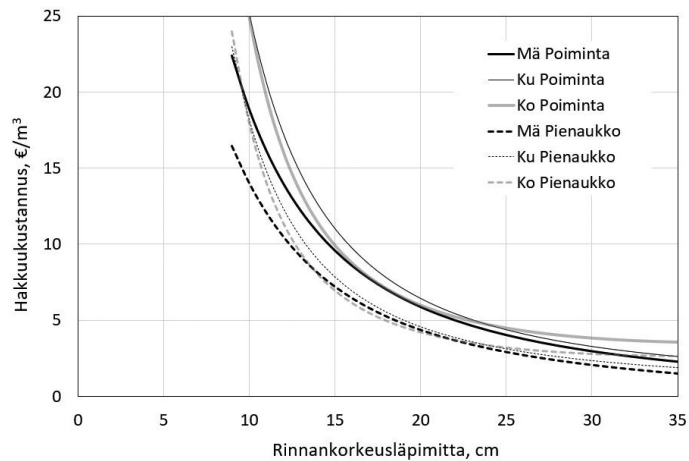
Kuva 8. Puutavaralajien osuudet rungon ainespuutilavuudesta tasoitettuna läpimittaluokittain männyllä, kuusella ja koivulla.

Figure 8. Proportions of timber assortments of the merchantable volume (%) by breast height diameter class for pine, spruce, and birch (Mänty = pine, Kuusi = spruce, Koivu = birch; Osuus ainespuutilavuudesta = proportion of merchantable stem volume, Rinnankorkeusläpimitta = breast height diameter, cm; Tukki = sawlog, Pikkutukki = small-diameter sawlog, Kuitupuu = pulpwood).



Kuva 9. Metsäkuljetuksen käyttötuntituottavuus puun rinnankorkeusläpimitan funktiona tutkimusleimikossa. Kuormakoko on kaikilla puutavaroilla 8 m³ ja vaihtoehtoisesti havupuutukeilla 12 m³.

Figure 9. Productivity of operating hours in forwarding as a function of breast height diameter in the experimental stand. A load volume (Kuorman koko) of 8 m³ was assumed for all timber assortments, and for sawlogs also 12 m³ was used (Metsäkuljetuksen tuottavuus = operating-hour productivity of forwarding, m³/E₁₅-h, Rinnankorkeusläpimitta = breast height diameter, cm; Kuorman koko = load volume, Mänty = pine, Kuusi = spruce, Koivu = birch, Mäntytukki = pine sawlog, Kuusitukki = spruce sawlog).



Kuva 10. Hakkuukustannuksen riippuvuus puun rinnankorkeusläpimitasta puulajeittain poiminta- ja pienaukkohakkuussa.

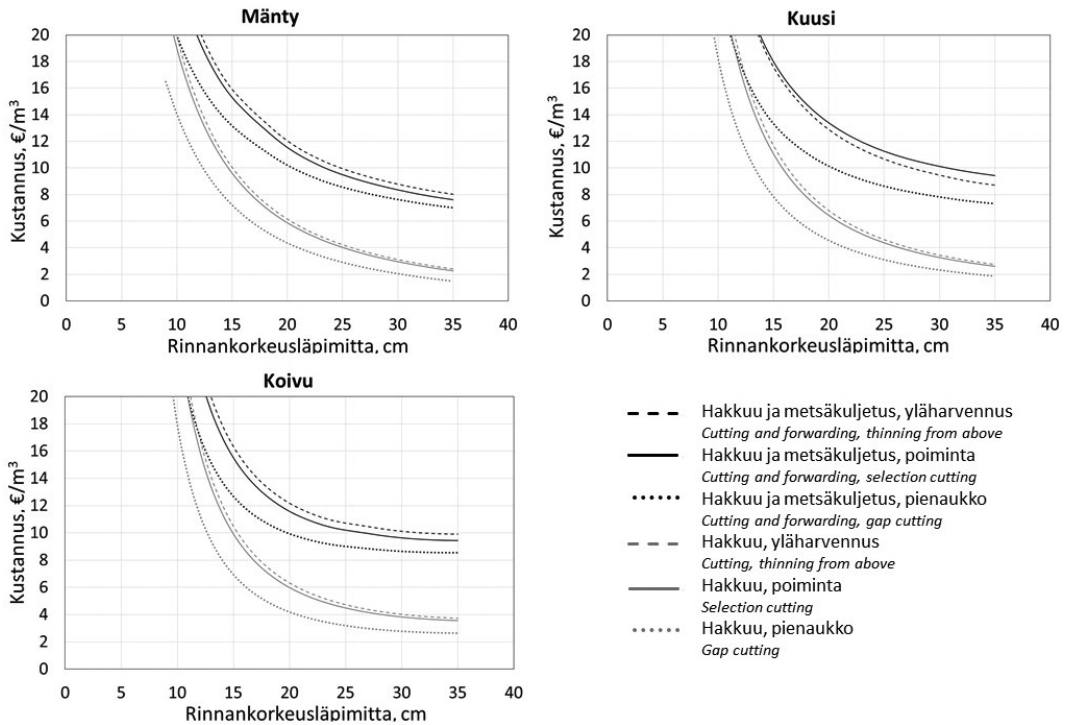
Figure 10. Effect of breast height diameter (Rinnankorkeusläpimitta, cm) on the cost of cutting (Hakkuukustannus, €/m³) by tree species for selection and gap cutting (Mä Poiminta = pine, selection cutting, Ku Poiminta = spruce selection cutting, Ko Poiminta = birch, selection cutting, Mä Pienaukko = pine, gap cutting, Ku Pienaukko = spruce, gap cutting, Ko Pienaukko = birch, gap cutting).

puiden korjuukustannus oli poimintahakkuilla 23–36 % korkeampi kuin pienaukkohakkuulla, männyllä pienin ja kuusella suurin. Suurimmilla, läpimitaltaan yli 30 cm:n puilla männyn korjuukustannus oli pienaukkohakkuulla enää 7,1 €/m³, kuusella 7,4 €/m³ ja koivulla 8,6 €/m³ (Kuva 11). Poimintahakkuilla tämänkokoisten puiden korjuukustannukset olivat männyllä ja koivulla noin 10 % em. kustannuksia korkeammat. Kuusella vastaava ero oli suurempi ja muista puulajeista poiketen kuusten poimintahakkuu olikin tässä koeleimikossa yläharvennusta kalliimpaa johtuen kuusen pienestä kertymästä poimintahakkuussa.

Männyn korjuukustannus oli alempi kuin kuusella ja koivulla, koska mäntyjen hakkuun tuottavuus ja kertymät olivat suurempia kuin muilla puulajeilla. Pienikokoisimpien kuitupuurunkojen korjuukustannus oli männyllä 20 % pie-

nempi kuin kuusella. Pienimmillä tukkirungoilla vastaava ero oli 7 % ja järeimmillä tukkipuilla 11 %. Rinnankorkeusläpimitaluokissa 11–23 cm koivun korjuukustannus oli 5–9 % kuusta alempi. Tätä suuremmilla rungoilla koivun korjuukustannus kohosi kuusen rinnalle, ja läpimitaltaan yli 30 cm:n koivuilla korjuukustannus oli 5–10 % suurempi kuin kuusilla.

Metsäkuljetuksen osuus puunkorjuukustannuksista nousi voimakkaasti puun koon kasvaessa (Kuva 11). Se oli poimintahakkuu- ja yläharvennuslohkoilla pienimmillä kuitupuilla noin 20 %, pienimmillä tukkipuilla ($d_{1,3} = 20$ cm) noin 50 % ja järeillä tukkipuilla 60–70 % korjuukustannuksesta, kun kuormakoko oli 8 m³. Kun havutukkikuormien kooksi oletettiin 12 m³, metsäkuljetuskustannus laski sitä enemmän, mitä järeämpää puuta ajettiin.



Kuva 11. Männyn, kuusen ja koivun korjuukustannukset (sis. hakkuu ja metsäkuljetus) suometsän poiminta- ja pienaukkohakkuussa, kun metsäkuljetuksen kuormakoko on 8 m³.

Figure 11. Harvesting cost (including cutting and forwarding; Kustannus, €/m³) with a forwarder load size of 8 m³ in the experimental stand (Rinnankorkeusläpimitta = breast height diameter, cm; Mänty = pine, Kuusi = spruce, Koivu = birch).

Tarkastelu

Tämän tapaustutkimuksen aineistona oli kuusi suometsikön hakkuulohkoa, jotka yksi kuljettaja hakkasi samalla koneella. Hakkuun tuottavuus riippuu kuljettajan lisäksi mm. olosuhteista ja hakkuukoneesta (esim. Liski ym. 2020), joten tutkimuksen tulokset edustavat vain tätä yhtä tapausta. Laaditut mallit kuvannevat kuitenkin tutkittujen hakkuutapojen ajanmenekkien suhdetta varsinkin luotettavasti, koska muut hakkuuseen vaikuttavat tekijät eivät vaihdelleet ja jokaisella hakkuutavalla hakattiin kaiken kokoisia runkoja (Kuva 3), vaikka käyttöosan keskitilavuus oli poimintahakkuussa suurin (0,443 m³) ja yläharvennuksessa pienin (0,289 m³) (Taulukko 1). Vastaavalla runkokoolla jatkuvapeitteiseen kasvatukseen tähtäävän poimintahakkuun ajanmenekki oli Jonssonin (2015) mukaan 40–50 % suurempi kuin avohakkuussa, mikä vastasi tässä tutkimuksessa saatua poimintahakkuun ja yläharvennuksen eroa pienaukkohakkuuseen verrattuna.

Tutkimusaineisto edustaa hakkuita, joissa poimintahakkuu tai erirakenteisuuteen tähtäävä yläharvennus tehdään harvennuksin hoidetulla 2-tyypin mustikka- ja puolukkaturvekankaalla, joilla on vaihtelevasti kuusialikasvosta ja ylempässä jaksossa mäntyjä, hieskoivuja ja kuusia. Hakkuutavat eivät kohdistuneet satunnaisesti, vaan ne valittiin puuston rakenteen perusteella. Poimintahakkuu tehtiin lohkoilla, joissa oli riittävä erirakenteisuus valmiina. Yläharvennus ja pienaukkohakkuu kohdistettiin lohkoille, joissa alikasvosta oli niukasti ja joilla hakkuun tavoitteena oli olemassa olevan taimiaineuksen kehittäminen ja uuden synnyttäminen. Näistä syistä hakkuutavat eivät ole suoraan vertailukelpoisia, mutta ne edustanevat sellaisia puustoja, joissa ko. hakkuutapoja käytännössä sovelletaan.

Hakkuun työvaiheet yhdisteltiin suoraan puuyksilöihin kohdistuvaksi kaatoon ja rungon käsittelyyn liittyväksi päätyöajaksi ja toisaalta puuyksilöihin kohdistumattomaksi aputyöajaksi. Jälkimmäinen allokoitiin erikokoisille puille niihin suoraan kohdistuvan ajanmenekin suhteessa. Tällainen kustannuserusteinen työajan jyvitys katsottiin perustellummaksi kuin tasajako tai vaikkapa tuotosperusteinen runkotilavuuteen perustuva allokointi.

Puutasen mallit laadittiin sekä rinnankorkeusläpimitan että rungon käyttöosan tilavuuden funktiona. Näin lisättiin mallien käytettävyyttä. Läpimitan käyttö on perusteltua silloin, kun puunkorjuun kustannuksia lasketaan ennen hakkuuta, esimerkiksi metsänkasvatuksen kannattavuutta arvioitaessa tai runkoinnoittelua sovellettaessa. Käyttöosan tilavuus saadaan tietoon vasta hakkuun jälkeen hakkuukoneen tietojärjestelmästä. Hakkuun tuottavuuteen liittyvissä tarkasteluissa tilavuus on usein käytännöllisempi kuin puun läpimitta, mutta mallituksessa huonolaatuisten puiden viat aiheuttavat ongelmia. Suurentunut ajanmenekki voi johtua puun vioista, jotka puolestaan pienentävät käyttöosan tilavuutta. Läpimitaan perustuvissa malleissa ei ole tätä epäloogisuutta.

Puutasolla kuusen hakkuun ajanmenekki riippui läpimitasta lähes suoraviivaisesti (Kuva 5). Myös ajanmenekin riippuvuus rungon käyttöosan tilavuudesta oli kuusella suoraviivaisempaa kuin männyllä ja hieskoivulla (Kuva 6). Männyllä ajanmenekki lisääntyi muita puulajeja nopeammin, kun läpimitta nousi 10 cm:stä 20 cm:iin ja runkotilavuus 50:stä 250 dm³:iin. Videoaineiston perusteella suomäntyjen lenkous ja mutkaisuus hidastivat juuri ja juuri tukkikokoon yltyvien mäntyjen prosessointia, kun runkoja rullattiin hakkuulaitteessa edestakaisin minimilaadun ja -koon varmistamiseksi. Tätä suuremmilla puilla ajanmenekin lisääntyminen hidastui ja loppui läpimitaltaan yli 35 cm:n rungoilla (tilavuus yli 600 dm³). Isot tukkimännyt olivat puolestaan korkealle oksattomia, joten niiden katkonta oli nopeampaa.

Hieskoivut katkottiin pääsääntöisesti kolmi- metriseksi kuitupuuksi hakkuukoneen automaattikalla. Niiden hakkuun ajanmenekki alkoi kohota voimakkaasti karsintaa vaikeuttavien paksujen ja pystyjen oksien vuoksi, kun rinnankorkeusläpimitta ylitti 25 cm ($v > 400 \text{ dm}^3$). Tukkien katkonnalla ei ollut juuri vaikutusta ajanmenekkiin, koska leimikosta tehtiin vain yksittäisiä vaneritukkeja.

Hakkuun kustannukset samankokoisilla puilla olivat poimintahakkuussa noin 40 % suuremmat kuin pienaukkohakkuussa (Kuva 10). Puustotason hakkuukustannus oli poimintahakkuussa kuitenkin vain 15 % pienaukkohakkuuta korkeampi,

koska poimintahakkuilla runkojen suurempi koko kompensoi hakkuutavasta johtuvaa kustannusvaikutusta. Yläharvennuksessa samankokoisten puiden hakkuu oli 47 % pienaukkohakkuuta kalliimpaa. Pienemmän rungon koon vuoksi puustotason kustannusero oli tätä suurempi, 58 %.

Pienaukkohakkuun tuottavuus oli tässä tutkimuksessa huomattavasti suurempi kuin normaaleilla harvennus- ja päätehakkuilla Liskin ym. (2020) tutkimuksessa, jonka mallit perustuvat automaattisesti tallentuneeseen hakkuukoneen ajanseuranta-aineistoon pitkältä aikaväliltä. Tässä tapaustutkimuksessa havainnoija oli paikalla koko hakkuukokeen ajan, mikä saattaa aineiston keruutavan erojen ohella selittää työn joutuisuutta (ns. Hawthorne-vaikutus, Mayo 1933). Tulosten vertailua muihin tutkimuksiin vaikeuttaa myös se, että alle 100 s:n keskeytykset luettiin ajanmenekkiin. Poimintahakkuun ja yläharvennuksen tuottavuus oli samaa luokkaa kuin harvennuksen tuottavuus vastaavankokoisilla rungoilla Liskin ym. (2020) tutkimuksessa. Tulos on yhdenmukainen Jonssonin (2015) ja Mannerin ym. 2023 tutkimusten kanssa. Laitilan ja Repolan (2023) tutkimuksessa kivennäismaalla Lapissa avohakkuun ajanmenekki oli 10–20 % pienempi kuin tämän tutkimuksen pienaukkohakkuussa. Kun poiminta- ja harvennushakkuussa alikasvos ei hidastanut hakkuuta, vastaava ero tähän tutkimukseen oli 30–40 %. Toisin kuin tässä tutkimuksessa, puukohtainen ajanmenekki Laitilan ja Repolan (2023) tutkimuksessa riippui lähes suoraviivaisesti rungon käyttöosan tilavuudesta. Yhtenä syynä tähän oli aputyöaikojen kohdistaminen runkoluvun perustella, jolloin pienille puille allokoitui enemmän aputyöaikaa kuin tässä tutkimuksessa.

Siirtymävaiheessa jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen hakkuutapojen tuottavuus voi olla alaharvennuksia suurempi, koska poistettava puusto on järeämpää (Manner ym. 2023). Myöhemmillä korjuukerroilla hakkuun ajanmenekki on Jonssonin (2015) arvion mukaan noin 30 % suurempi, kun hakkuu tehdään jo olemassa olevilta ajourilta. Tässä tutkimuksessa hakkuu tehtiin osittain vanhoilta kapeilta urilta, joiden vaikutus ajanmenekkiin oli vähäinen.

Rungon käyttöosan keskitilavuudet poimintahakkuussa ja yläharvennuksella olivat huomattavasti suurempia kuin Jylhän ym. (2019) seuran-

tutkimuksessa harvennushakkuilla. Puustotason korjuukustannukseksi saatiin pienaukolla 9,0 €/m³, poimintahakkuilla 9,6 €/m³ ja yläharvennuksilla 11,2 €/m³. Kun paremmissa kantavuusolosuhteissa havutukit laskettiin ajettavan 8 m³ kuormien sijasta 12 m³ kuormissa, korjuukustannus aleni 4–7 %, eniten poimintahakkuussa. Metsäkoneiden siirtoauton kustannukset eivät sisälly laskelmiin. Ne ovat Väätäisen ym. (2021) simulointitutkimuksen perusteella 0,4–0,9 €/m³ elokuun 2022 kustannustasoon päivitettyinä (Tilastokeskus 2022).

Vuonna 2021 Metsäteho Oy:n jäsenyritykset maksoivat puunkorjuuyrityksille tukkien korjuusta keskimäärin 7,7 €/m³ ja kuitupuun korjuusta 13,6 €/m³ (Strandström 2022). Tämän tutkimuksen tukki- ja kuitupuusuoksilla painotettuna tilastoidut keskimääräiset kustannukset ovat siten likimain samat kuin laskennalliset korjuukustannukset tässä tutkimuksessa. Tosin korjuukustannukset ovat nousseet vuoden 2021 jälkeen kustannusinflaation vuoksi. Vuonna 2021 jatkuvapeitteisten hakkuutapojen puunkorjuu oli Metsähallituksen työmailla yli 40 % kalliimpaa kuin jaksollisen metsänkasvatuksen avohakkuilla (Metsähallitus 2022). Tässä tapaustutkimuksessa hakatun puuston suuri koko selittää osaltaan pienehköjä kustannuseroja tavanomaiseen puunkorjuuseen verrattuna. Lisäksi korjuutyön suunnittelu ja organisointi voivat nostaa kustannuksia jatkuvapeitteisen metsänkasvatuksen puunkorjuussa, sillä leimikot ovat pienipiirteisiä ja korjuuyksiköt pienempiä kuin tavanomaisessa puunkorjuussa.

Erillään pidettävien puutavaralajien määrän lisääntyminen nostaa korjuukustannuksia. Tutkimusleimikossa mänty- ja kuusiparrujen metsäkuljetuskustannus oli 22–30 % (1,3–1,7 €/m³) suurempi kuin mänty- ja kuusikuitupuun (Taulukko 8). Hakkuussa pikkutukkien teko hidastaa puutavaran kasausta ja ehkä myös hieman karsintaa ja katkontaa, mutta tätä ei tutkittu. Voidaan arvioida, että pikkutukkien hakkuun ja metsäkuljetuksen yhteenlaskettu kustannus oli korkeintaan 2 €/m³ enemmän kuin jos nämä rungonosat olisi tehty kuitupuuksi.

Korjuuvaurioita ei selvitetty tässä tutkimuksessa. Alikasvoksen varomisella on huomattava vaikutus hakkuun tuottavuuteen. Niemistön ym.

(2012) tutkimuksessa alikasvoskuusikon vapautushakkuussa turvemaalla kuusten varominen alensi hakkuun tuottavuutta tiheässä hieskoivikossa 11–17 % ja harvennetussa 6–9 %. Kookkaan kuusentaimikon varominen alensi puolestaan tuottavuutta rauduskoivikon hakkuussa 20–30 %.

Johtopäätökset

Tässä tutkimuksessa saavutetut tuottavuustasot ovat todennäköisesti korkeampia kuin käytännön puunkorjuussa, joten tulosten yleistämisessä on noudatettava varovaisuutta. Tulokset kuvannevat kuitenkin varsin luotettavasti hakkuutapojen ja puulajien välisiä tuottavuuden ja korjuukustannusten suhteellisia eroja ja niiden syitä suomet-sissä.

Hakkuun tuottavuus oli suurin pienaukko-hakkuussa. Tuottavuus- ja kustannuserot poimintahakkuun ja yläharvennuksen välillä olivat pieniä samankokoisilla puilla, mutta puustotasolla poimintahakkuun kustannukset olivat lähempänä pienaukkohakkuuta ja yläharvennus selvästi kalliimpaa. Poimintahakkuu oli ensimmäinen erikäisrakenteisen puuston hakkuu, joten kertymä oli todennäköisesti suurempi kuin myöhemmissä hakkuissa. Kuusien koko ja osuus hakkuukertymästä ovat tulevissa hakkuissa suurempia, mikä alentaa niiden korjuukustannuksia. Mahdollisesti myös vähenevä puutavaralajien lukumäärä voi alentaa kustannuksia. Männyn ja etenkin koivun osuus kertymästä pienenee, joten niiden korjuukustannukset nousevat. Kokonaisuutena korjuukustannukset todennäköisesti nousevat tulevilla korjuukerroilla. Silloin hakkuun ja metsäkuljetuksen tuottavuudet ovat todennäköisesti pienempiä, koska korjattavat puut ovat keskimäärin pienempiä ja valmis ajouraverkosto pienentää hakkuukertymää. Myös alimpien latvuskerrosten puiden varominen lisää ajanmenekkiä.

Yleistymässä oleva runkohinnoittelu edellyttää korjuukustannusten laskentaa puutasolla. Jatkovapeitteisenä kasvatettavissa metsissä kokojakauma poikkeaa normaalijakaumasta, joten perinteiset puuston keskikokoon perustuvat ajanmenekkimallit johtavat puutasolla harhaan. Puutason ajanmenekkimallit ovat välineitä puunkorjuun kustannusten laskentaan rakenteeltaan

erilaisissa puustoissa, kun hakattavien puiden kokojakauma puulajeittain tunnetaan tai voidaan ennustaa. Tämän tapaustutkimuksen menetelmin voitaisiin laatia edustavammasta aineistosta luotettavampia puutason ajanmenekkimalleja, joita voitaisiin käyttää hakkuiden kustannuslaskentaan rakenteeltaan ja hakkuutavaltaan hyvinkin erilaisissa metsissä.

Kiitokset

Työ toteutettiin Hiiliviisas suometsien hoito sekä Kestävää metsänhoitoa turvemaille – ratkaisuja taloudellisiin ja ekologisiin ongelmiin (SuoPPP) -projekteissa. Hiiliviisas suometsien hoito-hanketta rahoitti Euroopan aluekehitysrahasto Keski-Pohjanmaan ja Etelä-Pohjanmaan liittojen kautta. SuoPPP-projektin rahoittajia olivat Green Carbon Finland Oy, Maa- ja metsätaloustuottajien keskusliitto MTK ry, Metsähallitus, Metsä Group, UPM-Kymmene Oyj ja Tornator Oyj.

Kirjallisuus

- Haarlas, R., Harstela, P., Mikkonen, E. & Mäkelä, J. 1984. Metsätyöntutkimus. Summary: Forest work study. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitoksen tiedonantoja 46. 50 s.
- IBM Corp. 2020. IBM SPSS Statistics for Windows, Version 27.0. Armonk, NY; IBM Corp; 2020. <https://www.ibm.com/docs/en>
- Jonsson, R. 2015. Prestation och kostnader i bländning med skördare och skotare. Arbetsrapport from Skogforsk 863.
- Juutinen, A., Ahtikoski, A., Mäkipää, R. & Shanin, V. 2018. Effect of harvest interval and intensity on the profitability of uneven-aged management of Norway spruce stands, *Forestry: An International Journal of Forest Research* 91(5): 589–602. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpy018>
- Juutinen, A., Ahtikoski, A. & Rämö, J. 2020. Puuntuotannon kannattavuuteen vaikuttavat tekijät jatkovapeitteisessä metsänkasvatuksessa. *Metsätieteen aikakauskirja*, artikkelitunnus 2020-10313. 11 s. <https://doi.org/10.14214/ma.10313>

- Jylhä, P., Jounela, P., Koistinen, M. & Korpunen, H. 2019. Koneellinen hakkuu. Seurantatutkimus. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 11/2019. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 53 s.
- Laamanen, V. 2014. Poimintahakkuukohteiden puuston rakenne, korjuutekniset olosuhteet, korjuukustannukset ja korjuujälki. Pro gradu -tutkielma. Helsingin yliopisto, maatalousmetsätieteellinen tiedekunta, metsätieteiden laitos. 85 s. + liitteet 5 s.
- Laitila, J. 2008. Harvesting technology and the cost of fuel chips from early thinnings. *Silva Fennica* 42(2): 267–283. <https://doi.org/10.14214/sf.256>
- Laitila, J. & Repola, J. 2023. Korjuukustannukset Lapin poimintahakkuukohteissa. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 45/2023. Luonnonvarakeskus. Helsinki. 57 s.
- 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. <https://doi.org/10.1080/14942119.2020.1820750>
- Manner J., Nordfjell T. & Lindroos O. 2013. Effects of the number of assortments and log concentration on time consumption for forwarding. *Silva Fennica* 47(4): 1030. <https://doi.org/10.14214/sf.1030>
- Manner J., Palmroth L., Nordfjell T., & Lindroos O. 2016. Load level forwarding work element analysis based on automatic follow-up data. *Silva Fennica* 50(3): 1546. <https://doi.org/10.14214/sf.1546>.
- Manner, J., Karlsen, T., & Ersson, T. 2023. A pilot study of Continuous Cover Forestry in boreal forests: Decreasing the harvest intensity during selection cutting increases piece size, which in turn increases harvester productivity. *Journal of Forest Science* 69(4): 172–177. <https://doi.org/10.17221/22/2023-JFS>.
- Mayo, E. 1933. The human problems of an industrial civilization. Macmillan Co., New York. 194 s.
- Metsähallitus. 2022. Metsähallituksen vuosi- ja vastuullisuusraportti 2021. 123 s. + 93 s. <https://julkaisut.metsa.fi/assets/pdf/mh-vuosittaiset/mhvuosikertomus2021.pdf>. [Viitattu 7.11.2022].
- Nieminen, M., Hökkä, H., Laiho, R., Juutinen, A., Ahtikoski, A., Pearson, M. Kojola, S., Sarkkola, S., Launiainen, S., Valkonen, S., Penttilä, T., Lohila, A., Saarinen, M, Hahti, K., Mäkipää, R., Miettinen, J., Ollikainen, M. 2018. Could continuous cover forestry be an economically and environmentally feasible management option on drained boreal peatlands? *Forest Ecology and Management* 424: 78–84. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.04.046>
- Niemistö, P., Korpunen, H., Laurén, A., Salomäki, M. & Uusitalo, J. 2012. Impacts and productivity of harvesting when retaining young understorey spruces in final cutting of downy birch (*Betula pubescens*). *Silva Fennica* 46(1): 81–97. <https://doi.org/10.14214/sf.67>
- Niemistö, P., Nuutinen, Y., Korpunen, H. Harvester's time consumption and logging damage in two storied Silver birch-spruce mixed forest. *Julkaisematon käsikirjoitus*.
- Pukkala, T., Lähde, E. & Laiho, O. 2012 Continuous Cover Forestry in Finland – recent research results. Teoksessa: Pukkala, T., von Gadow, K. (toim.) Continuous Cover Forestry. Managing Forest Ecosystems 23. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-94-007-2202-63>
- Repo, J. 2020. Suometsän poimintahakkuun, yläharvennuksen ja pienaukkohakkuun aikatutkimusvertailu Etelä-Pohjanmaalla. Opinnäytetyö. Karelia ammattikorkeakoulu, metsätalouden koulutus. 87 s. + 7 liitettä.
- Sarkkola, S., Hökkä, H., Penttilä, T. 2004. Natural development of stand structure in peatland Scots pine following drainage: results based on long-term monitoring of permanent sample plots. *Silva Fennica* 38(4): 405–412. <https://doi.org/10.14214/sf.408>
- Skogforsk. 2012. StanForD. Listing of variables by category. Version (last update) 2012-04-18. 141 s.
- Surakka, H. & Sirén, M. 2007. Poimintahakkuiden puunkorjuun nykytietämys ja tutkimustarpeet. *Metsätieteen aikakauskirja* 4/2007: 373–390.
- Strandström, M. 2022. Puunkorjuu ja kaukokujuetus vuonna 2021. *Metsätehon tulosalvosarja* 5/2022. Metsäteho Oy. 32 s.

- Tahvonen, O. & Rämö, J. 2016. Optimality of continuous cover vs. clear-cut regimes in managing forest resources. *Canadian Journal of Forest Research* 46(7): 891–901. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2015-0474>
- Tilastokeskus. 2022. Metsäalan kone- ja autokustannusindeksi. MEKKI 2015 = 100. 23.9.2022.
- Toikka, M. 2021. Kaistalehakkuun tuottavuus ja puustovauriot ojitettujen rämemänniköiden puunkorjuussa. Maisterin tutkielma. Helsingin yliopisto, metsätieteiden osasto. 65 s.
- Valkonen, S. 2022. Jatkovapeitteinen kasvatustus – mitä se on? Teoksessa: Routa, J. & Huuskonen, S. (toim.). 2022. Jatkovapeitteinen metsänkasvatustus: Synteesiraportti. Luonnonvara- ja biotalouden tutkimus 40/2022: 9–18. Luonnonvarakeskus. Helsinki.
- Väättäin, K., Hyvönen, P., Kankaanhuhta, V., Laitila, J. & Hirvelä, H. 2021. The Impact of Fleet Size, Harvesting Site Reserve, and Timing of Machine Relocations on the Performance Indicators of Mechanized CTL Harvesting in Finland. *Forests* 12(10): 1328

Symbols and abbreviations

$d_{1,3}$	Breast height diameter (cm)
E_{15}	Gross effective time (h , includes delays shorter than 15 min)
HT	Felling method
PL	Tree species (Mä = Scots pine, Ku = Norway spruce, Ko = downy birch, Kaikki = all)
N	Number of stems per hectare
v	Merchantable stem volume of a tree (m^3 , over bark)
V	Merchantable removal (m^3/ha , over bark)
Y_{ijk}	Time consumption for cutting a tree (s)
β_0	Constant
β_1	Fixed effect of cutting method at level j (thinning from below as a reference)
$\beta_2, \beta_5, \beta_6$	Fixed effects of tree species at level k (downy birch as a reference)
X_{ijkl}	Symbol representing tree size ($d_{1,3}$ or v)
f	Transformation function for tree size
x	Symbol describing the interaction of two variables
β_3, β_4	Coefficients for the parameter describing tree size at level l
β_{Haara}	The effect of a forked tree
μ_i	Random effect of the cutting day
ε_{ijkl}	Random error

Summary

The present case study constructed tree-level time-consumption models for thinning from above, selection cutting, and gap cutting in continuous cover peatland forestry based on time study data. In addition, the harvesting costs from stump to roadside were calculated. The cutting trial was conducted in a drained peatland forest in Western Finland in the winter of 2019. In the trial, an operator with 10-years of experience in mechanized cutting used a mid-sized single-grip harvester. An action camera was mounted inside the harvester's cabin, and the recorded videos were used to conduct a continuous time study. The removal data were derived from the stm files recorded by the harvester's onboard computer. The tree-level time consumption of the main work phases was modeled using a mixed linear model, and the auxiliary times and delays shorter than 100 s were allocated to the trees in relation to their predicted total main time consumption. The estimates for the forwarding time were calculated according to the studies by Manner et al. (2013, 2016). The hourly costs of the machinery are based on the studies by Jylhä et al. (2019), Laitila (2008), and Väätäinen et al. (2021).

On average, the tree-level time consumption in selection cutting was 40% higher than in gap cutting. Correspondingly, the time consumption in thinning from above was 47% higher than in gap cutting. These differences were primarily due to the increased time consumption of the harvester in moving between processing points and sorting the timber. In most cases, cutting Scots pine (*Pinus sylvestris*) was faster than cutting spruce (*Picea abies*) and birch (*Betula* sp.). However, the quality defects of pines that had recently reached sawlog dimensions increased the time consumption as the trunks were moved back and forth in the cutting device to determine an appropriate cross-cutting point. Cutting birches with a breast height diameter higher than 30 cm took more time than cutting conifers of an equivalent size because their thick and erect branches hampered delimiting.

The harvesting costs (including cutting and forwarding) were at the same level as conventional harvesting in even-aged forest management. The stand-level cost of harvesting was 9.0 €/m³ for gap cutting, 9.6 €/m³ for selection cutting, and 11.2 €/m³ (VAT 0%) for thinning from above. Due to the large stem volume, the selection-cutting cost was slightly higher than the cost of gap cutting. When thinning from above, a small stem size increases the harvesting cost. The forest haulage cost primarily depends on the load volume and forwarding distance. Increasing the load volume from 8 to 12 m³ for sawlogs reduces the cost of forwarding large-diameter trees. In this case, the harvesting cost in selection cutting was close to that of gap cutting. However, the bearing capability of peatland often limits the load size. Increasing the number of timber assortments tends to increase the harvesting cost. Making small-dimensioned sawlogs instead of pulpwood logs slightly increases the forwarding cost when the breast height diameter of the trees is 15 to 20 cm.

Keywords: continuous cover forestry, cutting, forwarding, gap cutting, harvesting, continuous cover forest management, harvesting cost, productivity, selection cutting, thinning from above