

Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa

Kari Väätäinen, Harri Liiri, Antti Asikainen, Lauri Sikanen, Paula Jylhä, Kaarlo Rieppo, Yrjö Nuutinen ja Antti Ala-Fossi



Metlan työraportteja / Working Papers of the Finnish Forest Research Institute -sarjassa julkaistaan tutkimusten ennakkotuloksia ja ennakkotulosten luonteisia selvityksiä. Sarjassa voidaan julkaista myös esitelmiä ja kokouskoosteita yms.

Sarjassa ei käytetä tieteellistä tarkastusmenettelyä. Kirjoitukset luokitellaan Metlan julkaisutoiminnassa samaan ryhmään monisteiden kanssa.

Sarjan julkaisut ovat saatavissa pdf-muodossa sarjan Internet-sivuilta.

<http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/>
ISSN 1795-150X

Toimitus

Unioninkatu 40 A
00170 Helsinki
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti julkaisutoimitus@metla.fi

Julkaisija

Metsäntutkimuslaitos
Unioninkatu 40 A
00170 Helsinki
puh. 010 2111
faksi 010 211 2101
sähköposti info@metla.fi
<http://www.metla.fi/>

Tekijät Väätäinen, Kari, Liiri, Harri, Asikainen, Antti, Sikanen, Lauri, Jylhä, Paula, Rieppo, Kaarlo, Nuutinen, Yrjö & Ala-Fossi, Antti			
Nimeke Korjureiden ja korjuuketjun simulointi ainespuun korjuussa			
Vuosi 2007	Sivumäärä 78	ISBN ISBN 978-951-40-2038-4 (PDF)	ISSN 1795-150X
Yksikkö / Tutkimusohjelma / Hankkeet Joensuun toimintayksikkö / 7165 Yhdistelmäkoneiden simulointi aines- ja energiapuun korjuussa			
Hyväksynyt Jari Parviainen, Joensuun toimintayksikön johtaja, 27.4.2007			
Tiivistelmä <p>Korjurit – yhdistelmäkoneet, joilla voidaan tehdä puunkorjuun molemmat päävaiheet, hakkuu ja lähikuljetus – etsivät paikkaansa skandinaavisessa tavaralajimenetelmän puunkorjuussa. Vaikka markkinoilla on useita vaihtoehtoisia korjurikonsepteja tarjolla ja useat tutkimustulokset niistä ovat olleet rohkaisevia, korjureiden käyttö on vielä hyvin vähäistä koneyrityksien keskuudessa.</p> <p>Yhdistelmäkoneiden simulointi aines- ja energiapuun korjuussa -hankkeessa selvitettiin korjureiden kannattavaa toimintatapaa ja käyttöaluetta suomalaisessa ainespuunkorjuussa koneyrityksillä. Korjureiden kilpailukykyä verrattiin yleiskokoluokan korjuuketjuun simulointimenetelmän keinoin kahdella puunkorjuualueella. Tutkimuksessa mukana olleet korjurikonseptit olivat Ponsse Dual ja Valmet Combi 801 sekä kiinteällä että kääntyvällä kuomatilalla. Korjuualueiden aineistona olivat StoraEnso Metsän hakkuutietokannat Kaakkois-Suomen (Saimaan) ja Pohjois-Pohjanmaan alueilta korjatuista leimikoista. Simulointien perusleimikkopankit koostuivat 2000 korjuulohkosta korjuukertymän ollessa yli 500 000 m³ kullakin korjuualueella.</p> <p>Simulointitutkimuksessa Ponsse Dual ja kääntyvällä kuomatilalla varustettu Valmet Combi 801 olivat kilpailukykyisimmät korjurikonseptit. Normaalin hakkuutaparakenteen vallitessa puunkorjuu korjureilla oli noin 4,6–18,6 % koneketjua kalliimpaa korjuualueesta, korjurikonseptista sekä korjuuketjun hakkuukoneen ja kuormatraktorin tuottavuuserosta riippuen. Simuloitaessa alle 200 m³:n leimikoita korjurit olivat hyvin lähellä korjuuketjun kustannustasoa. Perusleimikkoaineiston regressiotarkastelu osoitti korjureiden merkittävimäksi olosuhdetekijäksi leimikon hakkuukertymän, jonka kilpailukykyinen kannattavuusraja korjureilla ylsi harvennuskohteilla 80–115 m³:iin ja uudistushakkuukohteilla 90–190 m³:iin korjurikonseptista riippuen. Perusleimikkoaineistossa korjurit olivat korjuuketjua taloudellisempia 11,7–22,4 %:lla kaikista korjuulohkoista sekä 1,9–7,5 %:lla kokonaiskertymästä. Vuotuisen hakkuusuoritteen jäädessä korjuuketjulla alle 25 000 m³:n Kaakkois-Suomessa ja 20 000 m³:n Pohjois-Pohjanmaalla, korjureiden kustannuskilpailukykyisyys korjuuketjuun nähden parani merkittävästi.</p> <p>Korjureiden kannattavan ja kustannustehokkaan käytön perusedellytyksenä on korjuukohteiden hallittu ohjaus kulloinkin taloudellisesti sopivimmalle konekonseptille. Tämä edellyttää sekä riittävän suuren korjuukohdevarannon että korjuukaluston hallintaa. Tulevaisuudessa korjureiden kilpailukykyyn voidaan olettaa paranevan korjureiden kone- ja työtekniisten ominaisuuksien kehittyessä edelleen, korjuuyrittäjyyden toimintarakenteen siirtyessä enemmän alueyrityksien sekä kertymältään pienien korjuukohteiden lisääntyessä.</p>			
Asiasanat korjuri, korjuukustannus, simulointi, hakkuukone, kuormatraktori			
Julkaisun verkko-osoite http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2007/mwp048.htm			
Tämä julkaisu korvaa julkaisun			
Tämä julkaisu on korvattu julkaisulla			
Yhteydenotot Kari Väätäinen, Metsäntutkimuslaitoksen Joensuun toimintayksikkö, Yliopistokatu 6, 80101 Joensuu, kari.vaatainen@metla.fi			
Muita tietoja Hankkeen rahoittajat: Metsäntutkimuslaitos, Tekes, Stora Enso Oyj, Koneyrityksien liitto ry, Ponsse Oyj, Komatsu Forest, John Deere			

Sisällys

1 Johdanto.....	5
1.1 Taustaa.....	5
1.2 Simulointitutkimuksen avaintehtävät.....	6
2 Aineisto ja menetelmät.....	8
2.1 Leimikko- ja korjuulohkoaineisto.....	8
2.2 Simulointimalli.....	12
2.2.1 Mallin yleinen toiminta.....	12
2.2.2 Simuloinnin lähtöarvot ja asetukset.....	16
2.2.3 Ajanmenekkimallit.....	19
2.2.4 Simuloinnin todennäköisyysjakaumat.....	21
2.3 Puunkorjuun kustannuslaskenta.....	23
2.3.1 Konekustannuslaskenta.....	23
2.3.2 Korjuun yksikkökustannukset.....	26
2.4 Simulointiajot ja laskentatarkastelut.....	27
3 Tulokset.....	29
3.1 Korjuukonseptien ajanmenekkirakenteet.....	29
3.2 Korjuukonseptien käyttöasteet, tuottavuudet ja tuntikustannukset.....	33
3.3 Korjuun yksikkökustannukset.....	34
3.4 Korjuukustannusten ennustemallit korjuulohkole.....	37
3.5 Kilpailukykyiset korjuukohteet korjureille.....	43
3.6 Hakkuusuoritteen vaikutus korjuukustannuksiin.....	44
3.7 Herkkyysanalyysit korjuukonsepteille.....	46
3.8 Epätasapainoleimikot tuottavuuden suhteen.....	47
4 Tarkastelu.....	50
4.1 Aineiston ja menetelmien tarkastelu.....	50
4.1.1 Leimikko- ja korjuulohkoaineisto.....	50
4.1.2 Simulointimalli.....	50
4.1.3 Kustannuslaskenta.....	52
4.1.4 Regressiomallinnus.....	53
4.2 Tulosten tarkastelu.....	54
5 Päätelmät.....	58
Kirjallisuus.....	61

1 Johdanto

1.1 Taustaa

Tavaralajimenetelmällä tehtävään puunkorjuuseen on tarjolla useita erilaisia koneteknisiä vaihtoehtoja, joista koneyrittäjä voi valita toimintaympäristöönsä ja toiminnan laajuuteen sopivimmat konekonseptit. Tutkimuksissa mielenkiinto on viime aikoina kohdistunut lähinnä korjuriin (myös yhdistelmäkone tai kombikone), joilla voidaan tehdä puunkorjuun molemmat päävaiheet, hakkuu ja lähikuljetus. Korjurit jaetaan kone- ja työtekniisesti kahteen erilliseen päälinjaan. Ns. aidoilla korjureilla hakkuu ja lähikuljetus voidaan tehdä samalla ajokerralla varustusta vaihtamatta (esim. Valmet 801 Combi, Pinox 728 ja 828). Toista päälinjaa edustavat erillisellä hakkuulaitteella ja kourakuormaimella varustetut kuormatraktorialustaiset korjurit (esim. Ponsse Buffalo Dual ja Ponsse Wisent Dual). Suomessa sarjavalmistettavia korjureita lienee käytössä noin 60–70 kpl.

Korjureita kehitettäessä tavoitteena on ollut puunkorjuun kustannusten alentaminen, etenkin pääomapanoksen pienentäminen (Lilleberg ja Korteniemi 1997). Myös toiminnanohjaus on yksinkertaisempaa, kun hallittavana on ainoastaan yksi kone (Hallonborg 1998, Asikainen 2004, Bergkvist ym. 2003). Korjureille sopivina kohteina pidetään mm. pienialaisia harvennus- ja päätehakkuuta, saaristometsiä, myrskytuhoalueita ja siemenpuiden poistokohteita (Kärhä 2001 (toim.), Kangas 2003, Jylhä ym. 2006a). Korjuria voidaan käyttää korjuuketjua täydentävänä koneena silloin, kun ketjun koneiden tuottavuudet ovat epätasapainossa tai työt keskeytyisivät konerikon vuoksi (esim. Hallonborg 1998, Talbot ym. 2003, Hallonborg ym. 2005, Nordén ym. 2005). Korjurityötä pidetään vaihtelevana, sillä työskentely voidaan rytmittää olosuhteiden mukaan (Hallonborg 1998, Kärhä 2001 (toim.), Rieppo ja Pekkola 2001). Toisaalta korjurilla joudutaan työskentelemään yksin. Erityisesti talvella voidaan vähentää metsään jäävän puutavaran määrää, kun ajo tehdään samanaikaisesti tai heti hakkuun jälkeen (Hallonborg 1998, Rieppo ja Pekkola 2001, Bergkvist ym. 2003). Tällöin lumi ei ehdi peittää kasoja. Puutavara pysyy myös puhtaampana, jos se katkotaan kaadon jälkeen suoraan kuormaan (Hallonborg ym. 1999, Hallonborg ja Nordén 2000).

Tässä työraportissa esitellään Metsäntutkimuslaitoksen Yhdistelmäkoneiden simulointi aines- ja energiapuun korjuussa -hankkeen päätulokset. Tutkimusta rahoittivat Metlan lisäksi Tekes, Stora Enso Oyj ja Koneyrittäjien liitto ry sekä konevalmistajista Ponsse Oyj, John Deere ja Komatsu Forest. Hankkeen tavoitteena oli selvittää korjurin kilpailukykyistä käyttöaluetta osana puunkorjuun kokonaisjärjestelmää. Tutkimuksen työkaluksi rakennettiin puunkorjuun simulointiohjelma, jolla simuloitiin puunkorjuun ajanmenekit erilaisilla korjuukonsepteilla laajassa korjuulohkoaineistossa.

Tämän lisäksi hankkeessa tutkittiin korjureiden kilpailukykyä Pohjois-Italiassa ja Saksassa käyttäen Excel-pohjaista puunkorjuun systeemanalyysimallia, joka sisältää laskentapohjat kahdelle toisistaan poikkeavalle korjurikonseptille sekä korjuuketjulle (Emer 2005, Höglmeier 2007). Erillisellä rahoituksella toteutettiin vastaava tutkimus Puolan olosuhteissa (Pisarek ja Väättäinen 2007). Korjuri osoittautui kilpailukykyiseksi vaihtoehtoksi Keski-Euroopassa, jossa monet korjuun olosuhdetekijät poikkeavat pohjoismaisista korjurin eduksi. Merkittävin tekijä on pieni vuosityömäärä, sillä Keski-Euroopassa koneellista puunkorjuuta tehdään pääosin yhdessä vuorossa. Esimerkiksi Pohjois-Italiassa vuotuinen hakkuumäärä korjuuketjulla jää 10 000–15 000 m³:iin (Emer 2005). Korjuukaluston merkittävä vajaakäyttö lisää siten korjuukustannuksia eri-

tyisesti kahden koneen korjuuketjulla. Myös metsänkäsittelymääräykset ja -suositukset tukevat joiltakin osin korjureiden käyttöä. Jatkuvan metsänkasvatuksen periaatteiden mukaisissa hakkuissa hehtaariohittaiset kertymät jäävät usein pieniksi, mikä parantaa korjureiden kilpailukykyä. Lisäksi koneiden siirtokustannukset ja siirtojen osuudet kokonaistyöajasta ovat suuremmat kuin Suomessa. Siten kahden koneen kannattava siirto korjuukohteelle edellyttää hakkuukohteelta suurta kertymää kohteelta (Emer 2005 ja Höglmeier 2007). Esimerkiksi Höglmeierin (2007) tutkimuksessa korjurit olivat ketjuun verrattuna kilpailukykyisiä vielä 250–400 m³:n korjuukohteilla. Korjurit olivat kilpailukykyisimpiä harvennushakkuilla. Yleensä poimintahakkuina tehtävillä uudistushakkuilla korjureiden kilpailukykyä heikensivät liian suuri rungon koko ja suuret hakkuukertymät. Järeärunkoisilla hakkuilla tarvitaan suuren kokoluokan hakkuukoneita ja kuormatraktoreita. Tällaisilla kohteilla korjurihakkuun edellytyksenä on usein metsurityönä tehtävä kaato ja järeimpien rungonosien karsinta.

1.2 Simulointitutkimuksen avaintehävät

Lukuisista tutkimuksista ja käytännön kokemuksista huolimatta korjurin käyttömuodoista ja mahdollisuuksista koneyrittäjän näkökulmasta ei ole saatu kokonaiskuvaa. Lisäksi korjureiden työskentelytavat ja käyttö osana puunkorjuuyrityksen konekalustoa ovat vielä vakiintumattomia. Ensisijaisena tavoitteena oli selvittää korjureiden soveltuvuutta ja taloudellisuutta suomalaisessa puunkorjuussa. Simulointitutkimuksessa pyrittiin etsimään myös vastauksia siihen, mitkä ovat eri korjurikonseptien kilpailukykyiset toimintaympäristöt ja -tavat, kun korjuri toimii itsenäisesti tai osana yrittäjän korjuukalustoa. Simulointitutkimuksen avaintehävät olivat seuraavat:

- A. Korjuukonseptien kustannuskilpailukykyyn vertailu erilaisissa leimikko-olosuhteissa
 - Tarkastelun kohteena oli hakkuutavan ja korjuukohdepoistuman mukaan rajattuja leimikkosumia (leimikkopankkeja)
- B. Korjuukonseptien kilpailukykyyn tutkiminen normaalin hakkuutaparakenteen vallitessa
 - Keskeisimpien leimikkotekijöiden vaikutus kilpailukykyyn
- C. Vuotuisen hakkuumäärän vaikutus korjuukonseptien korjuukustannuksiin
- D. Herkkyysanalyysi merkittävimpien työvaihemuuttujien ja eri koneratkaisujen hankintahintojen suhteen
- E. Korjuuketjun epätasapainoleimikoiden havainnointi tutkimuksen leimikkoaineistoista

Simulointiohjelman käyttämä malliperhe käsitti aikaisemmin julkaistujen korjuuketjujen ajanmenekkimallien lisäksi korjureilla tehtyjen aikaturkimusten perusteella korjureille muokattuja uusia malleja. Simuloinneissa käytettiin aineistona Stora Enso Metsän korjuutietokantoja Saimaan (vuodelta 2003) ja Pohjois-Pohjanmaan (vuodelta 2005) korjuualueilla toteutetuista hakkuista. Käytössä olevat työskentelytavat kartoitettiin haastattelemalla korjurikuljettajia ja koneurakoitsijoita (Jylhä ym. 2006b). Korjureiden käyttöasteet saatiin Metsätehon tuoreesta seuranta tutkimuksesta (Kärhä ym. 2007a). Metsäkoneiden siirtokustannukset laskettiin Väättäisen ym. (2006a) kehittämällä laskentamallilla. Taustaselvityksenä koottiin kirjallisuuskatsaus, joka käsitti pääosan vuoden 1994 jälkeen julkaistuista korjuritutkimuksista (Jylhä ym. 2006a).

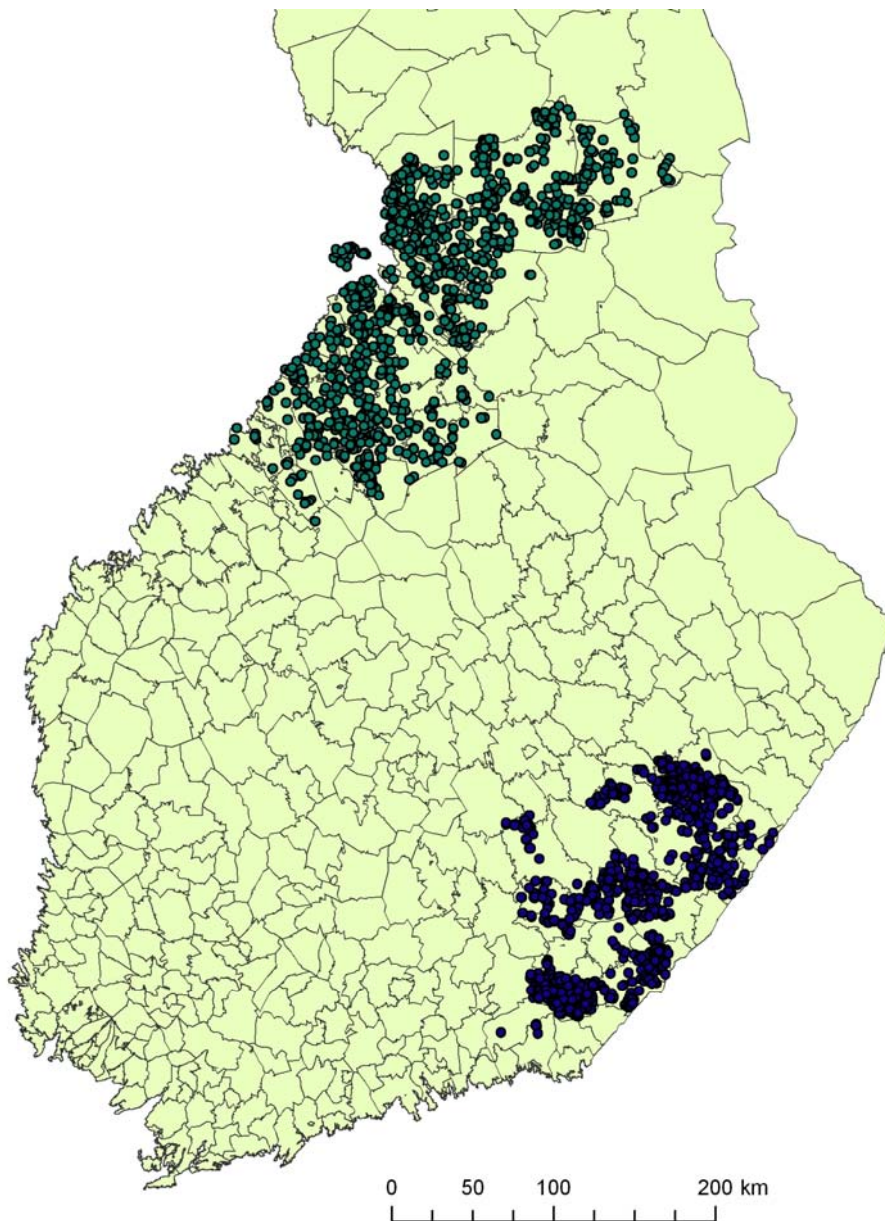
Raportissa esitellään simulointitutkimuksessa käytetty leimikkoaineisto, kuvataan simulointimallin rakenne ja toimintaperiaate sekä simuloinnissa käytetyt ajanmenekkimallit, todennä-

köisyysjakaumat, simulointiajot ja korjuun kustannuslaskenta. Tuloksissa keskitytään tuomaan esille korjureiden ja koneketjun välisiä eroavuuksia normaalin hakkuutaparakenteen vallitessa ja erikseen määritellyissä korjuuolosuhteissa. Tulosten tarkastelussa ja päätelmissä arvioidaan tulosten yleistettävyyttä, verrataan tuloksia uusimpiin korjuritutkimuksiin sekä tehdään päätelmiä korjurin kannattavasta käytöstä suomalaisessa puunkorjuussa.

2 Aineisto ja menetelmät

2.1 Leimikko- ja korjuulohkoaineisto

Tutkimuksen leimikko- ja korjuulohkoaineisto on peräisin kahdelta Stora Enso Metsän puunkorjuualueelta (kuva 1). Saimaan hankinta-alueen korjuulohkopankki koostuu vuonna 2003 koneellisesti hakatuista leimikoista. Pohjois-Pohjanmaan aineisto on peräisin vuodelta 2005. Korjuulohkopankit sisältävät kaikki näillä alueilla Stora Ensolle urakoineiden metsäkoneyrittäjien leimikot. Korjuulohko on pienin eritelty korjuukohdeyksikkö, joka eroaa kunkin leimikon sisällä muista lohkoista tärkeimpien korjuuseen vaikuttavien leimikkotekijöiden perusteella.



Kuva 1. Perusleimikkopankkien korjuulohkojen sijainnit Saimaan sekä Pohjois-Pohjanmaan korjuualueilla (2000 korjuulohkoa/korjuualue).

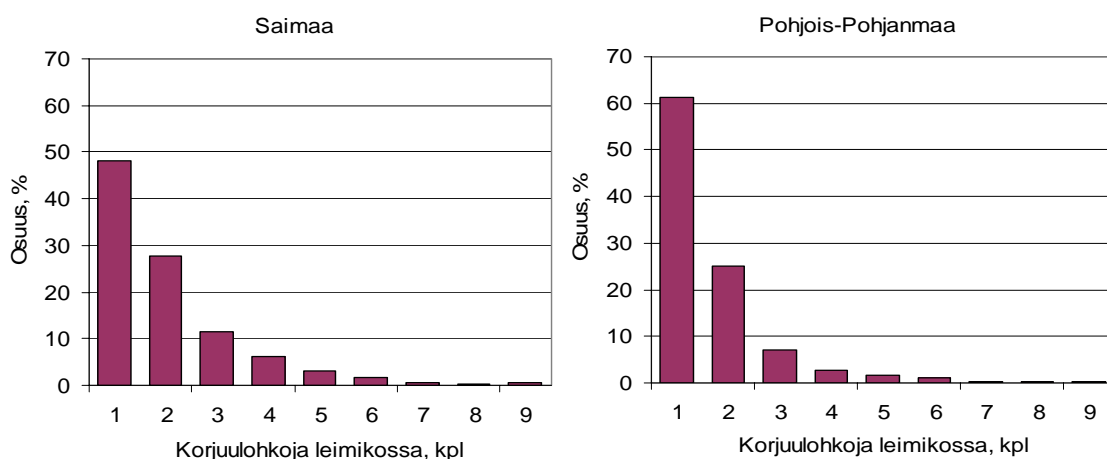
Alkuperäisen korjuulohkoaineiston koko Saimaan hankinta-alueelta oli 2902 leimikkoa ja 5921 korjuulohkoa, joiden korjuumäärä oli yhteensä 1 744 374 m³. Vastaavasti Pohjois-Pohjanmaan korjuulohkoaineistossa oli 1009 leimikkoa ja 2051 korjuulohkoa, joiden kokonaiskorjuumäärä

oli 506 585 m³. Korjuulohkoaineiston sisältämät tunnuksot on esitetty taulukossa 1. Taulukon viimeisen sarakkeen tunnuksot olivat samalla puunkorjuusimulaattorin korjuun ajanmenekki-mallien selittäviä muuttujia. Puunkorjuualueiden alkuperäisten leimikkoaineistojen korjuulohkojen lukumääräjakauma leimikolla on esitetty kuvassa 2. Saimaan hankinta-alueella leimikolla oli keskimäärin 3,14 korjuulohkoa ja Pohjanmaan piirien alueella keskimäärin 2,58 korjuulohkoa.

Taulukko 1. Alkuperäisten leimikko- ja korjuulohkopankkien taulukkomuuttujat korjuulohkoittain.

Korjuuaika	Korjuulohkon tunnus	Korjuupaikka	Korjuuyrittäjä	Korjuulohkon metsikkö ja puustotiedot
Vuosi	Leimikkokoodi	Aluekoodi	Yrityksen nimi	Hakkuutapa
Työn alku pvm	Lohkokoodi	Tiimikoodi	Yritystunnus	Pinta-ala
Työn loppu pvm		Paikka-koordinaatit		Ainespuurungot *, kpl
				Korjuumäärä *, m ³
				Keskimääräinen metsäkuljetusmatka *, metriä
				Keskirungon koko *, litraa

* muuttujien arvot puulajeittain sekä tukki- että kuitupuurungoille



Kuva 2. Alkuperäisten leimikkopankkien korjuulohkojen lukumääräjakauma leimikoissa Saimaan sekä Pohjois-Pohjanmaan korjuualueilla.

Alkuperäisistä korjuulohkopankeista suodatettiin 9 korjuurakenteeltaan toisistaan poikkeavaa korjuulohkopankkia kummallakin puunkorjuualueella. Ensimmäinen korjuulohkopankki (perusleimikkopankki) edusti tasaisesti kaikkia hakkuutapoja niiden normaalien hakkuumäärien suhteissa. Muut korjuulohkopankit valittiin rajatusti siten, että ne sisälsivät ainoastaan tiettyjä hakkuutapoja ja/tai korjuumääriä korjuulohko- tai leimikkokohtaisesti.

Pohjois-Pohjanmaan korjuulohkoaineistosta valittiin lähes kaikki korjuulohkot perusleimikkopankkiin (2000 lohkoa), kun taas alkuperäisestä Saimaan alueen leimikkopankista noin kolmasosa tuli valituksi simuloinnin leimikkoaineistoon. Saimaan alueen perusleimikkopankki sisälsi 14 eri korjuuyrittäjän hakkaamia leimikoita. Keskimäärin yrittäjillä oli 2,1 hakkuukonetta sekä 1,6 kuormatraktoria. Vastaavasti Pohjois-Pohjanmaan alueen perusleimikkopankki koostui 31 eri korjuuyrittäjän hakkaamista leimikoista ja yrittäjillä oli keskimäärin 1,4 hakkuukonetta sekä 1,2 kuormatraktoria.

Taulukko 2. Simulointien korjuulohkopankkien ominaisuustietoja.

Korjuulohkopankki	Poistuma korjuulohkolla				Osuus koko hakkuupoistumasta		Korjuulohkoja simuloinnissa	
	Saimaa		P-Pohjanmaa		Saimaa	P-Pohjanmaa	Saimaa	P-Pohjanmaa
	m ³ /lohk.	m ³ /ha	m ³ /lohk.	m ³ /ha	%	%	kpl	kpl
1. Perusleimikot: normaali hakkuutaparakenne	277	133	249	78	-	-	2000	2000
2. Päätehakkuut	451	192	334	96	57,2	48,2	500	500
3. Harvennushakkuut	217	54	226	37	26,1	38,5	500	500
4. Ylispuiden poisto	103	49	142	37	2,8	3,2	158	116
5. Ensiharvennukset	193	49	226	42	6,5	5,2	400	166
6. Normaali hakkuutaparakenne, leimikot < 50 m ³	27	23	28	19	0,3	0,6	140	98
7. Normaali hakkuutaparakenne, leimikot < 100 m ³	51	40	51	32	1,4	2,6	375	232
8. Normaali hakkuutaparakenne, leimikot < 200 m ³	86	57	88	38	5,4	10,2	500	500
9. Harvennushakkuut, leimikot < 100 m ³	58	37	50	28	0,2	0,1	152	102

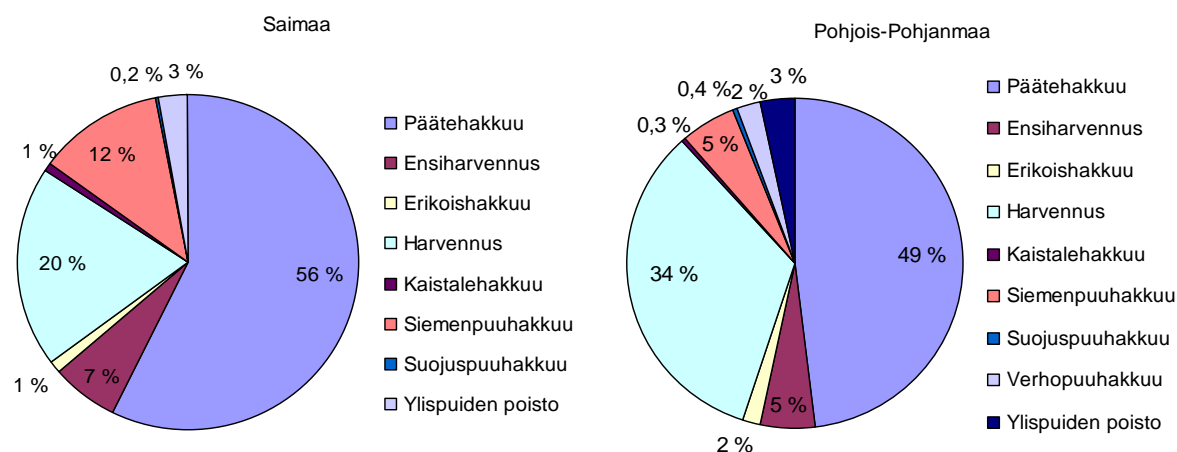
Simulointien korjuulohkoaineistoissa korjuulohkot listattiin korjuuajankohdan mukaiseen järjestykseen aina korjuuyrittäjittäin. Kussakin korjuulohkoaineistossa kunkin yrittäjän viimeisen hakatun leimikon jälkeen alkoi seuraavan korjuuyrittäjän ensimmäisenä hakattu leimikko. Perusleimikkopankkia lukuun ottamatta muissa korjuulohkopankeissa korjuulohkojen valita toteutettiin ensisijaisesti siten, että kyseinen hakkuutapa tuli olla valitun leimikon ainut tai valtahakkuutapa. Korjuulohkopankit sekä niiden poistumat ja osuudet kunkin alkuperäisaineiston kokonaispoistumasta on esitetty tarkemmin taulukossa 2.

Korjuulohkoaineistoissa jokaisesta korjuulohkosta oli tiedossa paikkatiedot koordinaatteina. Näin ollen aineiston jokaisen peräkkäisen korjuulohkon välinen suora etäisyys linnuntietä voitiin määrittää. Todellisempaa siirtoetäisyyttä kuvaava arvo laskettiin mutkittelukertoimen avulla. Asikaisen ym. (2001) tutkimuksessa mutkittelukeroin hakkuutähdehakkeen kuljetuksessa leimikolta käyttöpaikalle vaihteli alueittain 1,27:stä 1,32:en. Siirtyminen leimikolta toiselle kasvattaa entisestään mutkittelukerointa. Simulointitutkimuksessa mutkittelukertoimena käytettiin arvoa 1,6. Taulukossa 3 on esitetty leimikoiden sekä korjuulohkojen (mutkittelukertoimella korjatut) keskimääräiset siirtoetäisyydet eri korjuulohkopankeissa.

Taulukko 3. Korjuulohkojen sekä leimikoiden väliset keskimääräiset siirtoetäisyydet eri korjuulohkopankeissa (suluissa keskihajonnat).

	Korjuulohkojen väliset etäisyydet		Leimikoiden väliset etäisyydet	
	Saimaa	P-Pohjanmaa	Saimaa	P-Pohjanmaa
1. Perusleimikot	9,7 (18,6)	19,3 (25,6)	18,3 (22,6)	30,5 (26,4)
2. Päätehakkuu	13,2 (15,6)	24,6 (25,5)	18,7 (15,7)	33,0 (24,5)
3. Harvennukset	12,9 (15,0)	23,7 (25,1)	19,3 (14,9)	32,0 (24,2)
4. Ylispuuhakkuu	15,2 (15,3)	36,0 (30,8)	22,5 (13,9)	43,4 (28,6)
5. Ensiharvennukset	13,4 (16,2)	30,8 (27,4)	21,2 (16,2)	36,0 (26,3)
6. Alle 50 m ³	23,4 (27,6)	37,1 (21,7)	25,5 (28,0)	39,5 (20,2)
7. Alle 100 m ³	20,4 (25,1)	33,5 (24,6)	23,4 (25,6)	37,0 (23,3)
8. Alle 200 m ³	16,5 (16,4)	29,3 (24,2)	21,5 (15,7)	34,5 (22,6)
9. Alle 100 m ³ harv.	28,9 (35,2)	39,6 (24,0)	30,7 (35,6)	40,7 (23,4)

Perusleimikkopankeissa päätehakkuut olivat valtahakkuutapana hakkuupoistumaan suhteutettuna (kuva 3). Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen hakkuutaparakenne erosi Saimaan korjuualueesta erityisesti harvennusten suuremmalla osuudella. Taulukossa 3 on lisäksi esitetty perusleimikkopankkien (Saimaa ja Pohjois-Pohjanmaa) korjuuominaisuuksien keskiarvotunnuksia.



Kuva 3. Perusleimikkopankkien hakkuutapojen suhteet hakkuupoistuman osuutena Saimaan sekä Pohjois-Pohjanmaan korjuualueilta.

Taulukko 4. Perusleimikkopankkien korjuulohkojen ja leimikoiden keskiarvotunnuksia (suluissa keskihajonnat).

	Korjuulohkotaso		Leimikkotaso	
	Saimaa	P-Pohjanmaa	Saimaa	P-Pohjanmaa
Pinta-ala, ha	2,6 (2,7)	4,0 (4,7)	4,9 (5,4)	6,4 (7,8)
Kertymä/korjuulohko, m ³	277 (312)	249 (277)	533 (540)	400 (491)
Kertymä/ha, m ³	133 (106)	78 (53)	145 (98)	76 (48)
Keskijäreys, m ³	0,36 (0,23)	0,16 (0,09)	0,36 (0,20)	0,16 (0,09)
Metsäkuljetusmatka, m	321 (331)	338 (270)	300 (264)	339 (260)
Siirtoetäisyys, km	9,7 (18,6)	19,3 (25,6)	18,3 (22,6)	30,5 (26,4)

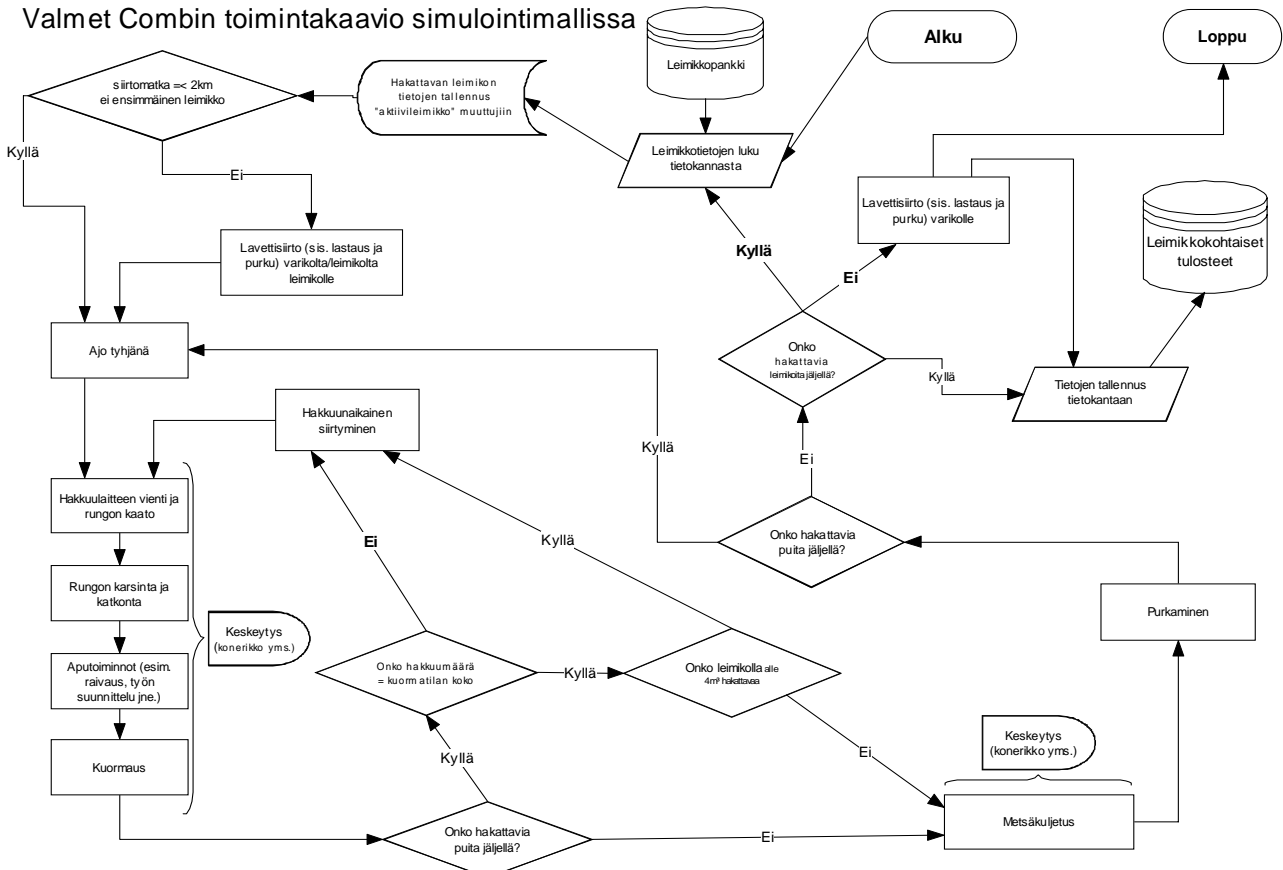
maa ja kuljettaa hakatun puumäärän varastolle. Ponsse Dual hakkaa ensin koko kohteen. Tämän jälkeen korjuri ajetaan varastolle, jossa koneen varustus vaihdetaan hakkuukoneesta ajokoneeksi. Lopuksi korjuri kuljettaa hakatun puumäärän tienvarteen. Ennen siirtoa seuraavalle korjuulohkolle korjuri vaihdetaan taas hakkuutilaan.

Korjuuketjun simulointimalliin on asetettu rajoite, jossa hakkuukone ei voi siirtyä yhtä hakattua korjuulohkoa edemmäksi kuormatraktorista. Jos esimerkiksi hakkuukone on siirtymässä kolmannelle korjuulohkolle kuormatraktorin kuljettaessa puuta vielä ensimmäisellä korjuulohkolla, hakkuukone odottaa siirtoa, kunnes lähikuljetus on saatu päätökseen ensimmäisellä kohteella. Odotusaikaa tulee myös silloin, kun hakkuukoneen tuottavuus on kuormatraktoria pienempi (esim. ensiharvennuksilla) eikä kuormatraktorille ole riittävästi (kuormatilan koon verran) kuormattavaa puumäärää. Simulointimalli tuottaa korjuuketjulle korjuutoiminnan kokonaisajat odotusaikojen kanssa ja ilman odotusaikoja.

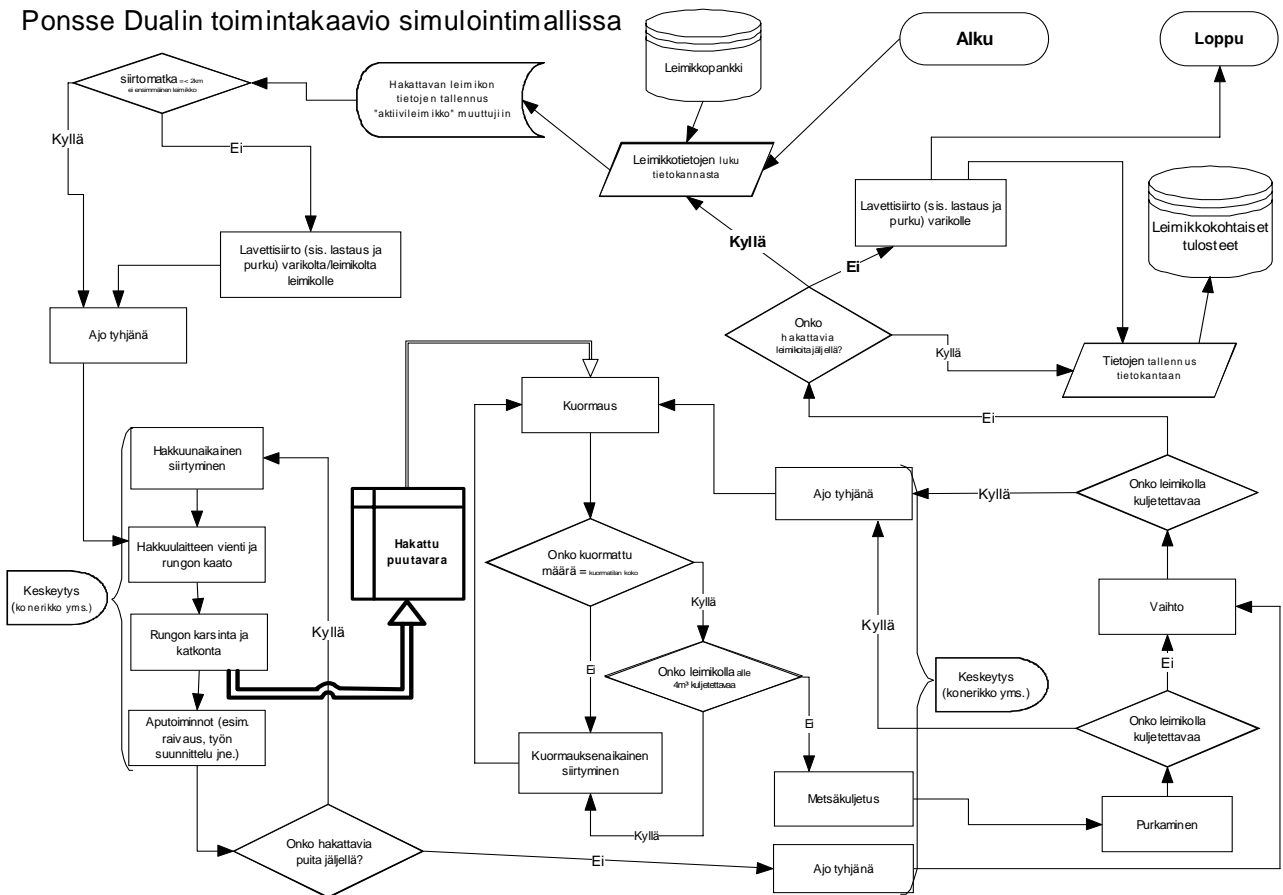
Kaikissa simulointimalleissa on määritetty korjuulohkon viimeiselle kuormalle neljän kuutiometrin lisäkuormamäärä, jos lohkolle on jäljellä kuormattavaa puuta sitä vähemmän. Lisäksi jos siirtomatka seuraavalle korjuulohkolle on korkeintaan kaksi kilometriä, kone/-et ajetaan seuraavalle lohkolle tai leimikolle.

Simulointimallit tallentavat jokaiselle korjatulle korjuulohkolle korjuutietorivin simuloinnin tulostiedostoon. Korjuutiedoista ilmenee jokaisen työvaiheen keskeytysten ja odotusten ajamenekit, konesiirtojen lukumäärä, siirtomatkat ja -ajat sekä korjattu puumäärä. Kahden koneen korjuuketjun simuloinnissa sekä hakkuukoneelle että kuormatraktorille muodostuu omat tulostiedostonsa. Simulointimalleihin ei sisällytetty työvuoroja, joten leimikkopankkien korjuu tapahtuu ilman työvuorokeskeytyksiä. Tosin simulointimalleissa käytetyissä konekeskeytysjakauksissa on huomioitu työvuorojen vaihtumisista aiheutuneet konekeskeytykset ja lopullisessa korjuun yksikkökustannusten laskennassa työvuoroasete on käytössä (ks. sivu 27). Näin ollen työvuorot ja niiden vaikutus korjuukustannuksiin on otettu huomioon.

Valmet Combin toimintakaavio simulointimallissa

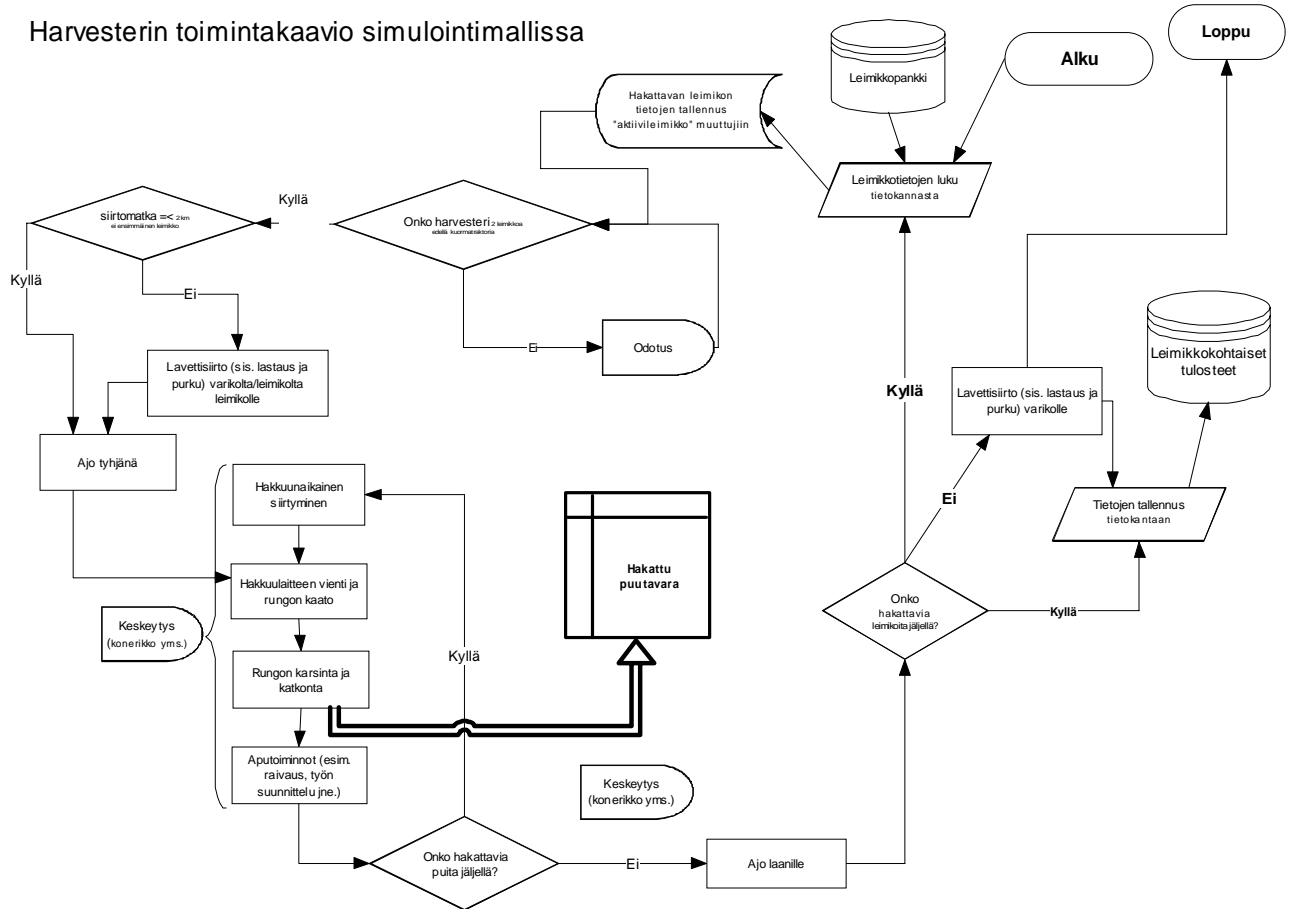


Ponse Dualin toimintakaavio simulointimallissa

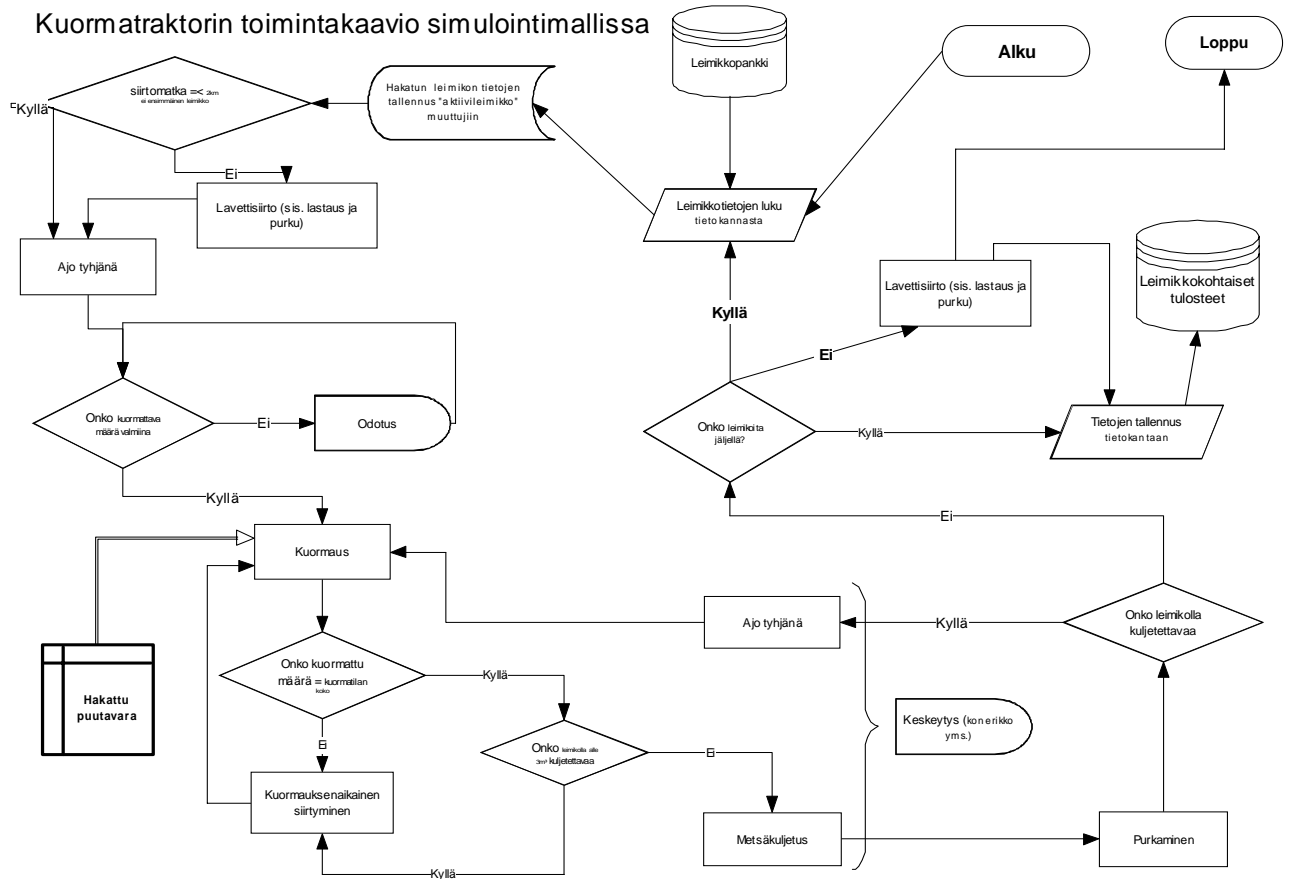


Kuva 5. Valmet 801 Combin ja Ponse Dualin toimintakaaviot simulointimallissa.

Harvesterin toimintakaavio simulointimallissa



Kuormatraktorin toimintakaavio simulointimallissa



Kuva 6. Hakkuukoneen ja kuormatraktorin toimintakaavio korjuuketjun simulointimallissa.

2.2.2 Simuloinnin lähtöarvot ja asetukset

Tutkimuksen konekonseptit ja niiden perustiedot

Korjureista tutkimuksessa olivat mukana Komatsu Forestin Valmet Combi 801 kiinteällä kuormatilalla ja kääntyvällä kuormatilalla. Valmet Combi edustaa ns. aitoa korjurikonseptia, jolla hakkuu ja lähikuljetus voidaan tehdä rinnakkain samalla ajokerralla varustusta vaihtamatta (kombikoneet). Toista korjurikonseptia edusti Ponsse Oyj:n Ponsse Dual korjurimallit, joita on kahta kokoluokkaa (Ponsse Wisent Dual, Ponsse Buffalo Dual). Ponssen konekonseptissa korjuun työtapojen vaihto edellyttää koneen varustuksen vaihtamista (koura/hakkuulaite, sermi, kuormatilan jatko ja pankot). Hakkuu ja metsäkuljetus tehdään siten erillisillä ajokerroilla.

Korjuuketjun ajanmenekkimallien ja kustannuslaskelmien osalta tutkimus perustui sekä ns. kevyisiin yleiskoneisiin (ts. harvennuskoneet) että varsinaisiin yleiskoneisiin hakkuukoneissa ja yleiskoneisiin sekä päätehakkuukoneisiin kuormatraktoreissa. Tuloksissa korjureita on pääosin verrattu korjuuketjuun, jossa hakkuukoneena on kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone. Taulukossa 5 on esitetty tutkimuksen konekonseptit ja niitä vastaavat konemallit. Korjureiden osalta tekniset tiedot on esitetty taulukossa 6.

Taulukko 5. Tutkimuksen konekonseptit ja niitä vastaavat konemallit.

Korjurit		Hakkuukoneet		Kuormatraktorit	
Combi-konsepti	Dual-konsepti	kevyet yleiskoneet*	yleiskoneet	yleiskoneet	päätehakkuukoneet
-Valmet 801 Combi kääntyvällä kuormatilalla,	-Ponsse Wisent Dual	-Valmet 901	-Valmet 911,	-Valmet 840,	-Valmet 860,
-Valmet 801 Combi kiinteällä kuormatilalla	-Ponsse Buffalo Dual	-Ponsse Beaver	-Ponsse Ergo,	-Ponsse Wisent,	-Ponsse Buffalo,
		-John Deere 1070	-John Deere 1270	-John Deere 1110	-John Deere 1410

* ts. harvennuskoneet

Taulukko 6. Simulointitutkimuksen korjureiden teknisiä tietoja.

	Ponsse Buffalo Dual ¹	Ponsse Wisent Dual ¹	Valmet 801 Combi ²
Omapaino, kg	15 700 – 16 400	14 800 – 15 000	19 800
Kantavuus, kg	14 000	12 000	13 000
Moottorin teho, kW	180	129	140
Nosturi	Ponsse K90 DUAL	Ponsse K90 DUAL	CRC 15
- ulottuma, m	10	10	11
Korjuukoura/hakkuulaite	Ponsse H53	Ponsse H53	Valmet 330.2 DUO
- paino, kg	850	850	alk. 750
- syöttö	3 rullaa	3 rullaa	2 rullaa
- suurin katkaisulpm, mm	520	520	480

¹8-pyöräinen malli.

²Tiedot sekä kiinteällä että kääntyvällä kuormatilalla varustetulla Valmet 801 Combilla

Korjuukonseptien työtekniikat

Aitojen korjureiden (mm. Valmet 801 Combin) työskentelytekniikat jaettiin Jylhän ym. (2006b) haastattelututkimuksessa seuraaviin pääryhmiin:

A. Ajoura avataan ja samalla käsitellään välialueet molemmilta puolilta. Kaikki tai suurin osa puutavaralajeista kuormataan ajouran avaamisen yhteydessä. Lopuksi ajoura

yhdistetään aikaisemmin avattuun ajouraan tai kokoojauraan tai käännetään korjuri ja palataan kuormattuna takaisin samaa ajouraa pitkin varastolle.

B. Ajoura avataan ja samalla voidaan hakata myös välialueen puuta. Kone käännetään uran päässä, ja palattaessa viimeistellään välialueiden hakkuu ja kuormataan aikaisemmin valmistettu puutavara.

C. Ajouran puut hakataan etuperin ajaen, ja samalla voidaan valmistaa myös välialueen puut. Kone palaa aluksi peruuttaen ja kuormaa menomatalla valmistetun puutavaran ja tarvittaessa viimeistelee välialueen hakkuun. Kone käännetään etuperin, kun täyttyvä kuormatila estää näkyvyyden. Kuormausta ja hakkuun viimeistelyä jatketaan etuperin liikkuen.

Edellä kuvatuissa työtekniikoissa on eroja lähinnä hytin ja kuormaimen kääntömäärien/-ajoissa sekä hakkuun- ja kuormauksenaikaisissa siirtymisajoissa. Eniten hytin ja kuormaimen kääntöjä kuormaa kohden on vaihtoehdossa A, toiseksi eniten B:ssä ja vähiten C:ssä. Hakkuun- ja kuormauksenaikaiseen siirtymiseen kuluu vähiten aikaa työtekniikassa A (samanaikaisesti molempia siirtymiä), kun taas B:ssä ja C:ssä siirtymien ajanmenekit ovat likimain samat. Kuitenkin kaikilla työtekniikoilla on oma käyttöalueensa. Simulointimalliin valittiin ns. *keskimääräinen työtekniikka*, joka on ajanmenekin perusteella yhdistelmä edellä esitetyistä työtekniikoista, mutta toiminnaltaan simulointimalli perustuu työtekniikkaan A.

Tutkimuksessa oli mukana myös kääntyvällä ja kallistuvalla kuormatilalla varustettu Valmet 801 Combi. Konekonseptin etuna on mahdollisuus katkoa puutavara suoraan kuormatilaan ja vähentää siten erillisen kuormauksen ajanmenekkiä. Toisaalta hakkuunaikainen rungon käsittelyaika kasvaa maahan puintiin verrattuna, harvennuksella päätehakkuuta enemmän. Rungon kaato on tällöin suunniteltava tarkemmin, ja kaadettu runko on siirrettävä kuormatilan reunaan asti tai lähelle sitä. Kuorman kasvaessa kuormatilaan prosessointi vaikeutuu. Myös kuormatilan ohjaustoimet vievät aikaa. Lisäksi katkonnan jälkeen puutavaraa joudutaan usein vielä lajittelemaan kuormatilassa. Kuorman katkottavan puutavaran osuuteen vaikuttavat leimikon ominaisuudet, valittu työtekniikka ja kuljettajan tottumukset.

Kääntyvän kuormatilan tapauksessa tarkasteltiin ensisijaisesti suorakuormausvaihtoehtoa 1, jossa harvennuskohteilla suoraan kuormaan puitiin 30 % rungoista ja vastaavasti muilla hakkuukohteilla 90 %. Vaihtoehto 2 edustaa lupauksellisempaa suorakuormaustekniikkaa, jota käytännössä on vaikeampi toteuttaa. Vaihtoehdossa 2 suorakuormauksen osuudet olivat vastaavasti 50 % ja 99 %. Suorakuormauksen vuoksi hakkuutyön ajanmenekkiä lisättiin molemmissa vaihtoehdossa 15 %:lla. Tutkimuksen konseptivertailut Valmet Combin kääntyvän kuormatilan osalta perustuvat pääosin suorakuormausvaihtoehtoon 1. Vaihtoehdon 2 avulla tutkimuksessa voitiin toisaalta tarkastella suorakuormauksen vaikutusta korjuutoimintaan ja sen kustannuksiin.

Hakkuussa Ponsse Dualin työtekniikka vastaa likimain tavallisen hakkuukoneen työtekniikkaa hakattaessa. Lähikuljetuksessa ei ole eroja. Tosin Dual-konseptilla kuormatilan peräosa rajoittaa hakkuutekniikan valintaa. Jokaisella korjuulohkolla Ponsse Dualille määritettiin kaksi korjuutavan vaihtoa. Ensimmäinen vaihto hakkuukoneesta kuormatraktoriksi tapahtuu vasta sitten, kun kaikki kohteen puut on hakattu. Viimeinen korjuutavan vaihto tapahtuu lähikuljetuksen jälkeen. Simulointimallissa koneen muutostöiden ajanmenekiksi asetettiin 20 minuutiksi. Hakkuukoneesta kuormatraktoriksi vaihdettaessa aika sisältää hakkuulaitteen vaihtamisen puutavarakouraan sekä sermin, pankkojen ja takarungon jatkeen nostamisen paikoilleen. Metsätehon TELMU-tiedonkeruulaitteella tekemässä seurannassa leimikkoa kohden oli keskimäärin 3,4 korjuutavan vaihtoa niillä kohteilla, joissa korjuri oli ainoa korjuukone (Kärhä ym. 2007a).

Kaikkien korjuukonseptien simulointimalleissa hakattujen puutavaralajien metsäkuljetus toteutetaan ns. sekakuormina. Ajouralta kuormataan samalla kertaa kaikki hakatut puutavaralajit. Menettely on yleinen harvennuksilla. Päätehakuilla tavaralajien lukumäärä ja hehtaarikohtainen kertymä ovat suuria, joten ajokertoja tulee useampia. Tällöin lajittelutarvetta voidaan vähentää rajoittamalla samalla kerralla kuljetettävien puutavaralajien määrää.

Hakkuutapakohtaiset määritteet

Korjuulohkopankeissa jokaiselle korjuulohkolle oli määritelty hakkuutapa, joita olivat ensiharvennus, muu harvennus, erikoishakkuu, kaistalehakkuu, siemenpuuhakkuu, ylispuiden poisto, verhopuuhakkuu (ainoastaan Pohjois-Pohjanmaa), päätehakkuu ja suojuspuuhakkuu. Korjuun työvaiheille määritettiin parhaiten kullekin hakkuutavalle sopivat ajanmenekkimallit. Harvennuksen työvaihemalleja käytettiin sekä ensiharvennuksilla että muilla harvennuskohteilla. Päätehakuun malleja käytettiin kaikissa muissa hakkuutavoissa.

Hakkuukohteiden ajouravarsitiheyksien ($\text{m}^3/100 \text{ m}$) määrittämisessä käytettiin laskennallisia ajouramääriä. Harvennuskohteilla (ensiharvennusten ja muiden harvennusten lisäksi verhopuuhakkuu) laskennallinen ajouraväli oli 18 metriä ja hehtaarikohtainen ajouramäärä 550 m/ha . Ylispuiden poistossa ajouravälinä käytettiin 20 metriä (ajouramäärä 500 m/ha) ja muissa hakkuutavoissa 13 metriä (ajouramäärä 770 m/ha) (ks. Kuitto ym. 1994, Nurminen 2005).

Kuormakoon määrittäminen

Korjureiden ja kuormatraktoreiden kuormakoot laskettiin hakkuutapaluokittain kuorman pinoitviyskerroin, keskipituuden ja poikkipinta-alan perusteella. Kuorman poikkipinta-ala vaihteli myös konekonseptittain (taulukko 7).

Taulukko 7. Kuormakoon laskentaan käytetyt arvot.

	Ensiharvennus	Muu harvennus	Muut hakkuut*
Kuorman pinoitviyskerroin			
havupuut	0,65	0,68	0,71
lehtipuut	0,56	0,59	0,62
Kuorman keskipituus, m	4,0	4,3	4,7
Kuorman poikkipinta-ala, m^2			
Valmet 801 Combi - kääntyvä kuormatila	4,4	4,4	4,4
Ponsse Wisent Dual			
Yleiskoneet – kuormatraktori			
Valmet 801 Combi - kiinteä kuormatila	4,7	4,7	4,7
Ponsse Buffalo Dual			
Päätehakuukoneet – kuormatraktori	5,0	5,0	5,0

*päätehakkuu, ylispuiden poisto, siemenpuuhakkuu, kaistalehakkuu, suojuspuuhakkuu, erikoishakkuu, verhopuuhakkuu

Esimerkiksi puhtaassa havupuutavaralajikuormassa ensiharvennuskohteella laskennallinen kuormakoko oli Ponsse Wisent Dualilla 11,44 m^3 , kiinteäkuormatilailla Valmet 801 Combilla 12,22 m^3 ja Ponsse Buffalo Dualilla 13,0 m^3 .

Leimikoiden ja korjuulohkojen väliset siirtymät

Jokaisen perättäisen korjuulohkon välille määritettiin sekä suora etäisyys linnuntietä että mutkitelutiekertoimen (1,6) avulla laskettu siirtoetäisyys. Jos korjuulohkojen välinen siirtomatka oli alle kaksi kilometriä, koneet siirrettiin ajaen lohkolta/leimikolta toiselle. Kun korjuulohkojen välinen siirtomatka oli kahta kilometriä pitempi, koneet siirrettiin kuljetusautolla. Simulointimallissa metsäkoneenkuljettaja itse ei ajanut koneenkuljetusautoa. Konesiirrot toteutti korjuuyrittäjä tai erikseen palkattu siirtoauton kuljettaja.

Korjuulohkolta toiselle metsäkoneilla ajaen kuluva aika laskettiin metsäkuljetuksen tyhjänä ajon nopeusmallin ja korjuulohkojen välisen etäisyyden avulla. Kun metsäkone oli siirtynyt korjuun loputtua lohkolta tienvarsivarastolle, se ajettiin heti työmaan varikkoalueella odottavaan kuljetusautoon. Korjuuketjulla saattoi tulla tilanteita, joissa toinen koneista joutui odottamaan siirtoa seuraavalle leimikolle silloin, kun toinen koneista oli siirrossa. Metsäkoneen kuljetustasolle ajoon, koneen kiinnityksiin ja muihin valmisteluihin kuluvaksi ajanmenekiksi asetettiin 15 minuuttia. Aikaa oletettiin kuluvan saman verran myös koneen poistamiseen kuljetustasolta määränpäässä. Kuljetuksen kokonaiskesto laskettiin käyttämällä puutavara-autojen ajonopeusmalleja ja korjuukohteiden välisiä siirtoetäisyyksiä. Simuloinneissa käytettiin seuraavia nopeusmalleja metsäkoneiden siirroille:

$$\text{Kuormattuna ajon nopeus (km/h)} = (S_{ku} * 60) / (10,7573 + 0,834 * S_{ku} - (0,5 / (S_{ku} + 2)))$$

$$\text{Tyhjänä ajon nopeus (km/h)} = (S_{ty} * 60) / (9,3133 + 0,77548 * S_{ty} - (0,5 / (S_{ty} + 2)))$$

, missä S_{ku} = kuormattuna ajomatka, km

S_{ty} = tyhjänä ajomatka, km

2.2.3 Ajanmenekkimallit

Korjuukonseptien ajanmenekkimallien pohjana käytettiin aikaisemmin julkaistuja hakkuukoneiden ja kuormatraktoreiden malleja (julkiset raportit) ja hankkeen aikana korjureilla tehtyjä täydentäviä aikatutkimuksia ja haastatteluja. Ajanmenekkimalleja määritettäessä perusteina olivat konekonseptien looginen vertailtavuus selittävien muuttujien koko vaihteluvälillä, jokaiselle konekonseptille yhteiset selittävät muuttujat kullekin työvaiheelle sekä mallien helppo päivitettävyys.

Ajanmenekkimallien perusmuodot ovat korjuukonsepteittain samankaltaiset jokaisen yhteisen työvaiheen osalta. Poikkeuksena ovat sellaiset työvaiheet tai konetoiminnot, jotka esiintyvät ainoastaan tietyssä konekonseptissa. Korjuukonseptien työvaihekohtaiset ajanmenekkieerot on tehty alkuperäisiin malleihin muunnosten avulla. Hakkuun työvaiheille käytettiin erillisiä ajanmenekkimalleja harvennuksille ja päätehakkuille. Harvennushakkuun malleja käytettiin ensi- ja muiden harvennusten lisäksi verhopuuhakkuissa. Päätehakkuiden malleja käytettiin kaikissa muissa hakkuutavoissa. Myös metsäkuljetuksen ajanmenekkimalleissa oli pieniä eroja hakkuutapojen välillä.

Taulukossa 8 on esitetty kaikki korjuun päätyövaiheet konekonseptittain. Työvaiheittaisten ajanmenekkimallien matemaattiset muodot esitetään liitteessä 1 ja graafiset muodot liitteessä 2. Konekonseptien väliset ajanmenekkieerot ilmenevät liitteen 2 kuvaajista. Merkittävimmät erot

työvaiheiden ajanmenekeissä konekonseptien välillä tulevat esille myös sivun 27 taulukosta 18. Hakkuun työvaiheiden ajanmenekkimalleissa yksikkönä on sekuntia käsiteltyä runkoa kohden. Metsäkuljetuksen työvaiheiden ajanmenekkien yksikkönä on sekuntia per kuutiometri.

Taulukko 8. Konekonseptien päätyövaiheet (V=Valmet Combi konseptit, V2=Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla, P=Ponsse Dual, H=hakkuukone, K=kuormatraktori)

Korjuun työvaiheet	Konekonseptit	Malli/Vakio
Hakkuu		
Siirtyminen hakkuupaikalle	P, H	M
Hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato	V, P, H	M
Karsinta ja katkonta	V, P, H	M
Hakkuunaikainen siirtyminen	P, H	M
Aputyövaiheet	V, P, H	V
Paluu tienvarsivarastolle	P, H	M
Metsäkuljetus		
Ajo tyhjänä	V, P, K	M
Kuormaus	V, P, K	M
Kuormauksen aikainen ajo	P, K	M
Ajo kuormattuna	V, P, K	M
Purku	V, P, K	M
Korjureiden erikoistyövaiheet		
Hakkuun ja kuormausenaikainen siirtyminen	V	M
Korjuutavan vaihto	P	V
Karsinta ja katkonta suoraan kuormatilaan	V2	M

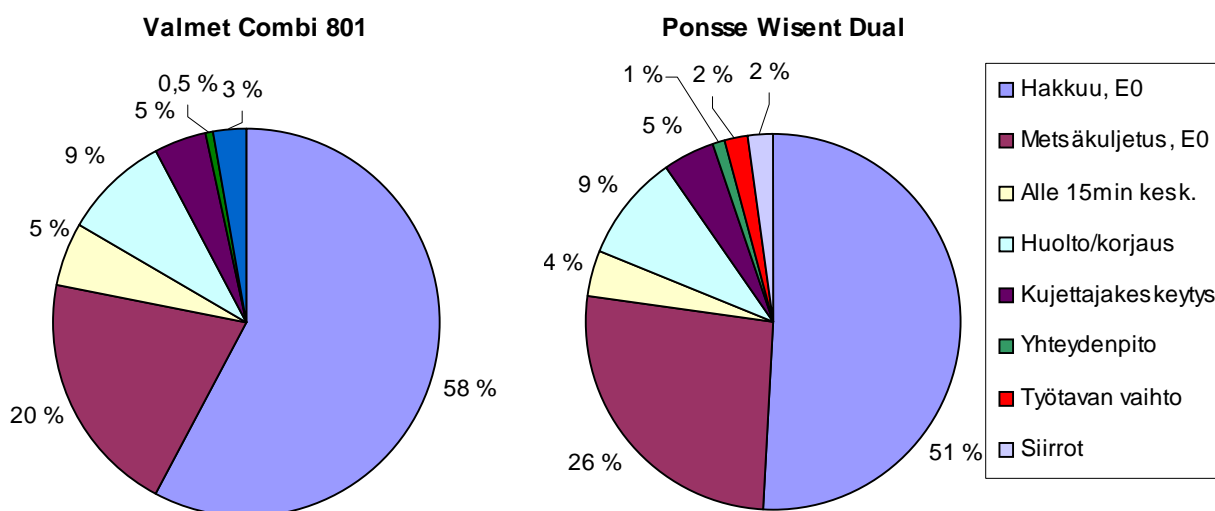
Tutkimukseen muokatut alkuperäiset mallit on hakkuun osalta koottu Kuiton ym. (1994), Sirénin (1998), Ryytäsen ja Rönkön (2001), Väätäisen ym. (2005a) ja Nurmisen ym. (2006) julkaisuista. Metsäkuljetuksen mallit ovat peräisin Väkevän ym. (2001) ja Brunbergin (2004) tutkimuksista. Hakkuun ajanmenekkimallit harvennuskohteille on koostettu useammista tutkimuksista muodostamalla keskiarvomallit eri työvaiheille. Päätehakuilla käytettiin joko Kuiton ym. (1994) tai Nurmisen ym. (2006) ajanmenekkimalleja.

Kunkin työvaiheen tehoajoista ja alle 15 minuutin keskeytyksistä koostuvaa käyttöaika korjattiin vielä seurantatutkimuksista saaduilla korjuukertoimilla korjuutavoittain (Kuitto ym. 1994). Hakkuutyössä työvaiheiden käyttöajanmenekit korjattiin kertoimella 1,276 vastaamaan käytännön työskentelyä. Vastaavasti metsäkuljetuksen työvaiheiden ajanmenekeillä korjauskertoimena oli 1,224.

2.2.4 Simuloinnin todennäköisyysjakaumat

Jakaumat konekeskeytyksille

Metsätehon korjureilta keräämän TELMU-seuranta-aineiston (Kärhä ym. 2007a) avulla analysoitiin korjureille empiiriset keskeytys- ja keskeytysvälijakaumat, joiden perusteella määritettiin niitä parhaiten kuvaavat teoreettiset todennäköisyysjakaumat. TELMU-seurannassa oli mukana kolme Ponsse Wisent Dualia ja kaksi Valmet 801 Combin -korjuria kiinteällä kuormatilalla (Kärhä ym. 2007a). Seurantatunteja Ponsse Wisent Dualeille kertyi 3 810 työtuntia ja Valmet 801 Combeille 1 340 työtuntia (noin 1/3 Dualin tunneista). Muilla kuin koneesta johtuvilla keskeytyksillä tasattuna molemmilla konseptilla oli lähes samat käyttöasteet (Ponsse Dual; tekninen KA: 90 %, toiminnallinen KA: 81 % ja Valmet Combi; tekn. KA: 90 %, toim. KA: 83 %) (Kuva 7). Ilman korjuutavan vaihtoja myös Ponsse Dualin toiminnallinen KA olisi 83 %. Konseptikohtaisessa keskeytysjakaumien vertailussa ei konekonseptien välillä ollut merkittävää eroa. Näin ollen koko seuranta-aineisto keskeytysten osalta yhdistettiin ja sitä käytettiin molemmille konseptille.



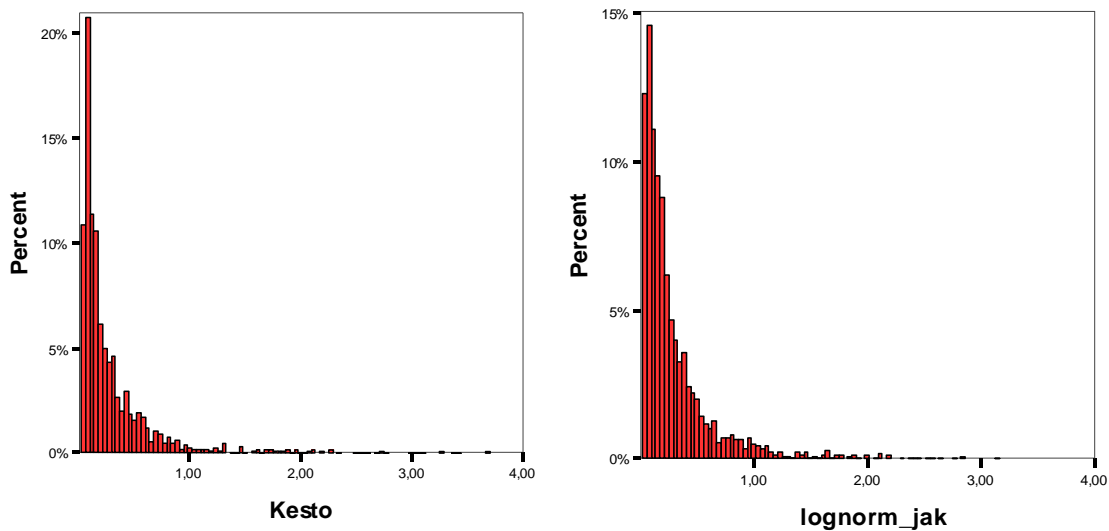
Kuva 7. TELMU-korjuriseurannan ajanmenekkirakenteet Valmet Combi 801 (kiinteä ktl.) sekä Ponsse Wisent Dual konekonseptille, kun kuljettajakeskeytykset on tasattu.

Keskeytykset sisältävät kaikki Telmu-aineiston työtapakohtaiset keskeytykset, jotka eivät sisälly teholliseen työaikaan. Keskeytykset luokiteltiin seuraavasti: a) koneesta johtuvat keskeytykset (huolto, korjaus), b) kuljettajasta johtuvat keskeytykset (ruokatauot ym.), c) yhteydenpito (puhelut, työjohdon työmaakäynnit ymv.) ja d) muut keskeytykset.

Taulukossa 9 on esitetty empiiristen keskeytysjakaumien keskitunnukset sekä jakaumia parhaiten kuvaavat todennäköisyysjakaumat. Lisäksi kuvassa 8 havainnollistetaan todelliseen hakkuun keskeytysjakaumaan sovitettu teoreettinen jakauma otosmäärän ollessa 2093 havaintoa.

Taulukko 9. Korjureiden keskeytysjakaumien keskitunnukset sekä simuloineissa käytetyt todennäköisyysjakaumat.

Keskeytysmuoto:	Keskiarvo, tuntia	Keskihajonta, tuntia	Todennäköisyysjakauma
Hakkuun keskeytykset	0,33	0,60	Lognormaali
Metsäkuljetuksen keskeytykset	0,30	0,45	Lognormaali
Keskeytysten väli hakkuussa	1,37	1,32	Lognormaali
Keskeytysten väli metsäkuljetuksessa	1,8	1,77	EkspONENTTI



Kuva 8. Korjureiden yhdistetty hakkuunaikaisten keskeytysten ajanmenekkejakauma sekä siihen sovitetusta lognormaalisesta todennäköisyysjakaumasta generoidut arvot. Kesto esitetty tunteina.

Korjuuketjuilla käytettiin simuloineissa samoja keskeytysjakaumia pienin muutoksin. Korjuuketjun simuloineissa oletettiin, että tekninen varmuus on hiukan korjureita parempi sekä hakkuukoneella että kuormatraktorilla. Hakkuun ja metsäkuljetuksen keskeytysten keston jakaumakeskiarvoa kasvatettiin 20 %:lla. Siten hakkuukoneen toiminnalliseksi käyttöasteeksi perusleimikkopankkien simuloineissa saatiin 83 % ja kuormatraktorin 88 %.

Jakaumat rungon sekä kuorman koolle

Simulointimallissa jokaiselle hakattavalle rungolle ennustettiin rungon koko katkaistun normaalijakauman avulla. Siinä kunkin korjuulohkon puulajikohtaiset runkokeskiarvot olivat jakaumien keskiarvoparametreina. Puulajikohtainen keskihajontaparametri laskettiin kaavalla, jossa keskihajonta lisääntyy rungon koon kasvaessa.

Keskihajonnan kaava: $SD = V_{\text{rkoko}} * 0,054 + 0,03$

Rungonkokojakauma katkaistiin molemmista päistä siten, ettei simulointiin tullut 0,05 m³:ttä pienempiä eikä 2 m³:ta suurempia runkoja. Jos jakauma tarjosi ainespuukokoa pienempiä tilavuuksia, ne korjattiin aina korjuulohkon keskirunkokokoa vastaavaksi.

Konekonseptikohtaisesti kuormien koon annettiin vaihdella korjuulohkoittain lasketun keskiarvokuorman ympärillä käyttämällä normaalijakaumaa ja sille hajontaparametrin arvoa 0,7.

2.3 Puunkorjuun kustannuslaskenta

2.3.1 Konekustannuslaskenta

Koneiden kustannuslaskenta perustuu yleisesti käytettyyn metsäkoneiden kustannuslaskentatapaan, jossa koneen kiinteät (pääoma)kustannukset jaetaan koneen käyttöajalle (vuosille) ja muuttuvat (käyttö)kustannukset lasketaan kustannuksiin suoraan vuotuisen käyttötuntimäärän perusteella. Taulukoissa 10–14 on esitetty koneiden kustannuslaskennassa käytettyjä arvoja. Kustannustekijät vastaavat kevään 2006 hintatasoa.

Taulukko 10. Kustannuslaskennan arvot pääomatekijöille.

	Peruskone	Hakkuulaite/yhdistelmäkoura
Käyttöikä		
Korjurit ja hakkuukone	13 000 tuntia	7 000 tuntia
Kuormatraktori	15 000 tuntia	
Vuotuinen arvon väheneminen	27 %	27 %
Jäännösarvo	23 %	20 %

Taulukko 11. Kustannuslaskennan arvot kulutustekijöille.

Kulutuskustannukset	
Polttoaine (Valmet 801 Combi, Ponsse Dual, Hakkuukone, Kuormatraktori)	V: 11,5 P: 11 H: 12 K: 10 litraa/tunti
Moottoriöljy	0,1 litraa/tunti
Vaihteistoöljy	0,1 litraa/tunti
Hydrauliöljy	0,2 litraa/tunti
Teräketjuöljy	0,57 litraa/tunti
Värimerkkausaine	0,3 litraa/tunti
Teräketju	0,055 kpl/hakkuutunti
Terälaippa	0,02 kpl/hakkuutunti

Taulukko 12. Kustannuslaskennan käyttökustannusarvot (hinnat arvonlisäverollisina).

Käyttökustannusarvot	
Polttoaine	0,65 €/litra
Moottoriöljy	1,01 €/litra
Vaihteistoöljy	1,3 €/litra
Hydrauliöljy	1,35 €/litra
Teräketjuöljy	1,35 €/litra
Värimerkkausaine	1,3 €/litra
Teräketju	15 €/teräketju
Terälaippa	53 €/terälaippa
Korjaus- ja huoltokustannus (Korjurit, Hakkuukone, Kuormatraktori)	Ko 9,69 €/E ₁₅ (käyttötunti), H 10,63 €/ E ₁₅ , Ku 7,81 €/ E ₁₅
Siirtokustannus koneenkuljetusautolla	1,5 €/km (ALV 0%)

Taulukko 13. Kustannuslaskennan työkustannustekijät.

Työkustannustekijöitä	
Tuntipalkka konetyöajalle (E ₁₅) (Korjurit ja Hakkuukone, Kuormatraktori)	Ko ja H 11,2 €/h, Ku 10,4 €/h
Tuntipalkka muulle työajalle	Ko ja H 11,2 €/h, Ku 10,4 €/h
Iltavuorolisä	0,77 €/h
Väiilliset palkkakustannukset	63 % peruspalkasta
Työmatka-ajo (keskimäärin työvuorolle)	60 km
Työmatkakorvaus	0,4 €/km
Ateriakorvauspäivät	100 pv/vuosi
Ateriakorvaus	7,0 €/päivä

Taulukko 14. Kustannuslaskennan kiinteät kustannustekijät.

Kiinteät kustannustekijät	
Pääoman poisto	(*) €/vuosi
Laskentakorko	4,5 %
Vakuutukset (liikenne, palo jne.) (Korjurit ja Hakkuukone, Kuormatraktori)	Ko ja H 2 564 €/vuosi, Ku 1 710 €/vuosi
Hallinto- sekä ylläpitokustannukset (ATK, puhelin, koulutus, laskenta jne. sekä konepesu, varastointi, varaosa säilytys)	Ko ja H 6 800 €/vuosi, Ku 4 533 €/vuosi
Riskilisiä	5 %

(*) Pääoman poiston laskenta kaavalla: (Hankintahinta - Jäännösarvo)/Käyttöikä

Kustannuslaskennassa käytetyt koneiden listahinnat ilman arvonlisäveroa on kerätty laitevalmistajilta vuoden 2006 huhti-toukokuun aikana (Taulukko 15). Korjuuketjun osalta sekä hakkuukoneen että kuormatraktorin hankintahinnat ovat kolmen eri laitevalmistajan (Komatsu Forest, Ponsse ja John Deere) keskiarvohintoja saman kokoluokan koneista. Hintoihin on lisätty keskimääräisen varustetason (telat, GPS ym.) kustannukset, jotka ovat korjureille ja hakkuukoneille 12 000 € ja kuormatraktorille 8 000 € (alv 0 %).

Taulukko 15. Korjuukoneiden arvonlisäverottomat listahinnat, joihin on lisätty perusvarustelun kustannukset (alv 0 %).

Hankintahinnat	
Valmet Combi 801 (kiinteä kuormatila)	397 000 €
Valmet Combi 801 (kääntyvä kuormatila)	427 000 €
Ponsse Wisent Dual	356 000 €
Ponsse Buffalo Dual	373 000 €
Hakkuukone, kevyet yleiskoneet (Valmet 901, Ponsse Beaver, John Deere 1070)	333 667 €
Hakkuukone, yleiskoneet (Valmet 911, Ponsse Ergo, John Deere 1270)	371 667 €
Kuormatraktori, yleiskoneet (Valmet 840, Ponsse Wisent, John Deere 1110)	223 333 €
Kuormatraktori, päätehakkuukoneet (Valmet 860, Ponsse Buffalo, John Deere 1410)	239 333 €

Korjureiden ja hakkuukoneiden hakkuulaitteiden/yhdistelmäkourien pääomapoistoissa käytettiin hakkuulaitteen hintana 50 000 euroa. Kuormatraktoreiden hintoina on kaikilla merkeillä käytetty 8-pyöräisten mallien listahintoja. Taulukoissa 16 ja 17 on esitetty korjuualuekohtaiset kustannuslaskelmat kullekin konekonseptille. Tuntikustannukset perustuvat perusleimikkosuman simulointiajoon. Käyttötuntimäärä kaikille koneille asetettiin 2 500 tunniksi.

Taulukko 16. Konekonseptien tuntikustannuslaskelma Saimaan hankinta-alueella. Kustannuslaskennan arvot perustuvat 2 500 käyttötuntiin kaikilla koneilla.

	Valmet Combi 801 kiinteä kuormatila	Valmet Combi 801 kääntyvä kuormatila ¹	Ponsse Wisent Dual	Hakkuu- kone ² (keski kl)	Kuorma- traktori ² (keski kl)
Hankintahinta, €	397 000	427 000	356 000	333 667	223 333
-josta hakkuulaitteen osuus, €	50 000	50 000	50 000	50 000	-
Peruskoneen jäännösarvo, (hakkuulaitteen JA) €	79 810 (10 000)	86 710 (10 000)	70 380 (10 000)	65 243 (10 000)	51 367
KUSTANNUKSET					
Työkustannus					
Urakka- ja tuntipalkka, €	32 109	32 294	32 618	33 804	29 301
Työvuorolisä, €	342	343	347	354	333
Välilliset palkkakustannukset, €	20 444	20 561	20 768	21 519	18 669
Työmatkakorvaus, €	9 318	9 357	9 451	9 626	8 712
Ateriakorvaus, €	700	700	700	700	700
YHT. , €	62 912	63 256	63 884	66 003	57 716
Muuttuvat kustannukset³					
Polttoaine, €	15 318	15 318	14 652	15 984	13 320
Moottoriöljy, €	207	207	207	207	207
Vaihteistoöljy, €	266	266	266	266	266
Hydrauliöljy, €	553	553	553	553	553
Teräketjuöljy, €	643	762	677	1 577	-
Värimerkkausmaali, €	326	386	343	799	-
Teräketju, €	689	817	726	1 691	-
Terälaippa, €	885	1050	933	2 172	-
Korjaus- ja huolto, €	19 857	19 857	19 857	21 784	16 005
Siirtokustannus, €	3 919	4 328	4 051	8 374	5 902
YHT. , €	42 663	43 545	42 267	53 407	36 253
Kiinteät kustannukset					
Pääoman poisto, (peruskone – hakkuulaite), €	(51 383 – 5 821)	(55 825 – 6 904)	(45 312 – 6 136)	(42 004 – 14 286)	28 661
yhteensä, €	57 204	62 729	51 448	56 290	
Pääoman korko, €	12 240	13 195	10 976	10 467	6 826
Vakuutukset, €	2 564	2 564	2 564	2 564	1 710
Hallinto- ja ylläpitokustannus, €	6 800	6 800	6 800	6 800	4 533
YHT. , €	78 808	85 288	71 788	76 121	41 730
Riskitekijä, €	9 219	9 604	8 897	9 777	6 785
YHTEENSÄ, €/vuosi	193 603	201 692	186 836	205 307	142 484
KUSTANNUS, €/käyttötunti	77,4	80,7	74,7	82,1	57,0
Korjuumäärä, m³/vuosi	19 187	21 190	19 853	47 970	33 810

¹Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla (VE1), suorakuormausta harvennuksilla 30 % ja muualla 90 %²Kustannus perustuu oletamaan, että korjuuketjulla tuottavuuseroista kertyvät koneiden odotusajat voidaan eliminoida kokonaan korjuun ohjauksella ja työvuorojärjestelyillä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktori yleiskone.³Laskettu arvonlisäverottomilla hinnoilla

Taulukko 17. Konekonseptien tuntikustannuslaskentataulukko kustannustekijöineen Pohjanmaan hankinta-alueella. Kustannuslaskennan arvot perustuvat 2 500 käyttötunnille kaikilla koneilla.

	Valmet Combi 801 kiinteä kuormatila	Valmet Combi 801 kääntyvä kuormatila ¹	Ponsse Wisent Dual	Hakkuu- kone ² (keski kl)	Kuorma- traktori ² (keski kl)
Hankintahinta, €	397 000	427 000	356 000	333 667	223 333
-josta hakkuulaitteen osuus, €	50 000	50 000	50 000	50 000	-
Peruskoneen jäännösarvo, (hakkuulaitteen JA) €	79 810 (10 000)	86 710 (10 000)	70 380 (10 000)	65 243 (10 000)	51 367
KUSTANNUKSET					
Työkustannus					
Urakka- ja tuntipalkka, €	32 297	32 472	32 610	33 534	29 539
Työvuorolisä, €	343	345	347	352	334
Väilliset palkkakustannukset, €	20 563	20 675	20 763	21 348	18 820
Työmatkakorvaus, €	9 360	9 398	9 443	9 586	8 733
Ateriakorvaus, €	700	700	700	700	700
YHT. , €	63 263	63 590	63 863	65 520	58 126
Muuttuvat kustannukset ³					
Polttoaine, €	15 318	15 318	14 652	15 984	13 320
Moottoriöljy, €	207	207	207	207	207
Vaihteistoöljy, €	266	266	266	266	266
Hydrauliöljy, €	553	553	553	553	553
Teräketjuöljy, €	795	921	831	1 577	-
Värimerkkausmaali, €	403	467	421	799	-
Teräketju, €	852	987	891	1 691	-
Terälaippa, €	1 095	1 268	1 144	2 172	-
Korjaus- ja huolto, €	19 857	19 857	19 857	21 784	16 005
Siirtokustannus, €	3 655	3 963	3 721	6 412	6 661
YHT. , €	43 002	43 808	42 545	51 445	37 012
Kiinteät kustannukset					
Pääoman poisto, (peruskone – hakkuulaite), €	(51 383 – 7 201)	(55 825 – 8 342)	(45 312 – 7 527)	(42 004 – 14 286)	28 661
yhteensä, €	58 584	64 167	52 838	56 290	
Pääoman korko, €	12 271	13 227	11 007	10 467	6 826
Vakuutukset, €	2 564	2 564	2 564	2 564	1 710
Hallinto- ja ylläpitokustannus, €	6 800	6 800	6 800	6 800	4 533
YHT. , €	80 219	86 758	73 210	76 121	41 730
Riskitekijä, €	9 324	9 708	8 981	9 654	6 843
YHTEENSÄ, €/vuosi	195 809	203 864	188 598	202 741	143 712
KUSTANNUS, €/käyttötunti	78,3	81,5	75,4	81,1	57,5
Korjuumäärä, m³/vuosi	13 343	14 470	13 587	26 808	27 849

¹Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla (VE1), suorakuormausravennuksilla 30 % ja muualla 90 %

²Kustannus perustuu oletamaan, että korjuuketjulla tuottavuuseroista kertyvät koneiden odotusajat voidaan eliminoida kokonaan korjuun ohjauksella ja työvuorojärjestelyillä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

³Laskettu arvonlisäverottomilla hinnoilla

2.3.2 Korjuun yksikkökustannukset

Korjuun yksikkökustannusten laskentaan käytetään korjuun simulointiajojen tulostiedostoon koottuja ajanmenekkejä ja konekustannuslaskennasta saatuja tietoja. Simuloinnin tulostiedot ohjaavat konekustannuslaskentaa simuloinneista saatujen koneiden käyttöasteiden, siirtomatkojen ja -aikojen sekä korjuun ajanmenekkien mukaan. Jokaisen konekonseptin tulostiedosto sovitettiin edustamaan koneen käyttöaikaa yhden vuoden ajalle ja 2 500 käyttötunnille. Tämän jäl-

keen kullekin konseptille laskettiin käyttöajan perusteella vuotuiset korjuukustannukset ja korjuun yksikkökustannukset.

Konekustannuslaskennassa yhden työvuoron työajaksi asetettiin 8 työtuntia. Työpäivien määräksi oletettiin keskimäärin 22 päivää kuukaudessa. Vuoden 11 kalenterityökuukaudesta yhden työvuoron työkuukausia oli kuusi ja kahden työvuoron työkuukausia viisi.

2.4 Simulointiajot ja laskentatarkastelut

Jokaisen korjuukonseptin simulointimallilla ajettiin kertaalleen molempien korjuualueiden korjuulohkopankit (9 korjuulohkopankkia/korjuualue) (ks. taulukko 2 sivulla 10). Perusajojen lisäksi konseptille tehtiin herkkyystarkastelua taulukossa 18 esitetyille työvaiheiden ajamenekkeille ja koneiden hankintahinnoille. Lisäksi tutkittiin vuotuisen korjuumäärän vaikutusta korjuukustannuksiin eri konsepteilla. Tarkempi lohko-kohtainen korjuukustannusanalyysi tehtiin molempien korjuualueiden perusleimikkopankeille.

Taulukko 18. Toteutetut herkkyyshanalyysit eri konekonsepteille.

Konsepti	tarkastelun kohde	lähtöero korjuuketjuun ¹	muutos lähtöarvosta
Valmet Combi 801 (molemmat konseptit)	hakkuun ajanmenekki	+ 9,9 % ^S , +8 % ^P	10 %
	kuormattuna ja tyhjänä ajo	+ 10 % ^S , + 10 % ^P	10 %
	kuormaus	+ 8,7 % ^S , + 6,7 % ^P	10 %
	purku	+ 38 % ^S , + 39 % ^P	10 %
	hankintahinta		10 %
Ponsse Wisent Dual	hakkuun ajanmenekki	+ 5,4 % ^S , +4,6 % ^P	10 %
	kuormaus	- 7,8 % ^S , -7,7 % ^P	10 %
	purku	- 10 % ^S , -10 % ^P	
	hankintahinta		10 %
Korjuuketju ²	hankintahinta		10 %

¹keskimääräinen ero Saimaan sekä Pohjois-Pohjanmaan korjuualueilla (^S = Saimaa, ^P = Pohjois-Pohjanmaa)

²Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

Perusleimikkopankkien korjuukustannusanalyysissä jokaiselle korjuulohkolle laskettiin konseptittain korjuukustannus hakattua kuutiometriä kohden. Regressioanalyysillä laadittiin korjuukustannuksen ennustemallit kullekin korjuulohkolle. Korjureista tarkastelussa olivat mukana Ponsse Wisent Dual sekä Valmet Combi 801 kiinteällä ja kääntyvällä kuormatilalla. Korjuuketjutarkastelussa oli hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Regressioanalyysissä käytettiin SPSS:n askeltavaa (stepwise) menetelmää, jolla kustannusenustemalleihin valittiin tilastollisesti merkitsevimmät korjuumuuttujat. Muuttujille tehtiin tarvittavat muunnokset ja poikkeavat arvot suodatettiin. Ennustemallien selittäviksi muuttujiksi valikoitui viisi merkitsevää muuttujaa ($p < 0,001$). Lopullinen aineiston koko Saimaan korjuualueella oli 830 harvennuslohkoa ja 1110 hakkuutavaltaan muuta korjuulohkoa (yhteensä 1940 korjuulohkoa). Vastaavasti Pohjois-Pohjanmaan regressioaineisto koostui 940 harvennuslohkosta ja 1001 muusta korjuulohkosta (yhteensä 1941 lohkoa).

Korjuulohko-kohtaisessa korjuukustannusten laskennassa perusleimikkopankkien simuloinneista käytettiin konekonseptikohtaisia käyttötuntikustannuksia, joista oli vähennetty konesiirtojen

kustannusosuus (taulukko 19). Tarkastelussa jokaiselle korjuulohkolle määritettiin erikseen kone siirron/-siirtojen kustannukset. Laskennassa käytettiin leimikkoaineiston lohkojen välistä siirtomatkaa. Koneenkuljetusauton matkaksi varikolta leimikolle ja takaisin oletettiin 30 km yhteen suuntaan. Kertyneiden siirtokilometriä ja siirron kilometrikustannuksen avulla laskettiin kullekin korjuukoneelle siirtokustannus. Siirron kilometrihintana käytettiin 1,5 €/a. Tämä konekonseptikohtainen siirtokustannus lisättiin kunkin metsäkoneen tuntikustannukseen korjuulohkoittain..

Taulukko 19. Koneiden tuntikustannukset ilman siirtokustannusten osuutta. Suluissa esitetty tuntikustannuksen ero lähtötilanteeseen.

	Koneiden tuntikustannukset ilman siirtoja, €/h (ero alkuperäiseen tuntikustannukseen, €/h)				
	Ponsse Wisent Dual	Valmet Combi		Korjuuketju ¹	
		kiinteä kuormatila	Valmet Combi kääntyvä kuormatila	hakkuukone	kuormatr.
Saimaan korjuualue	73,0 (-1,7)	75,8 (-1,6)	78,9 (-1,8)	78,6 (-3,5)	54,5 (-2,5)
Pohjois-Pohjanmaan korjuualue	73,9 (-1,5)	76,8 (-1,5)	79,9 (-1,6)	78,4 (-2,7)	54,7 (-2,8)

¹Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

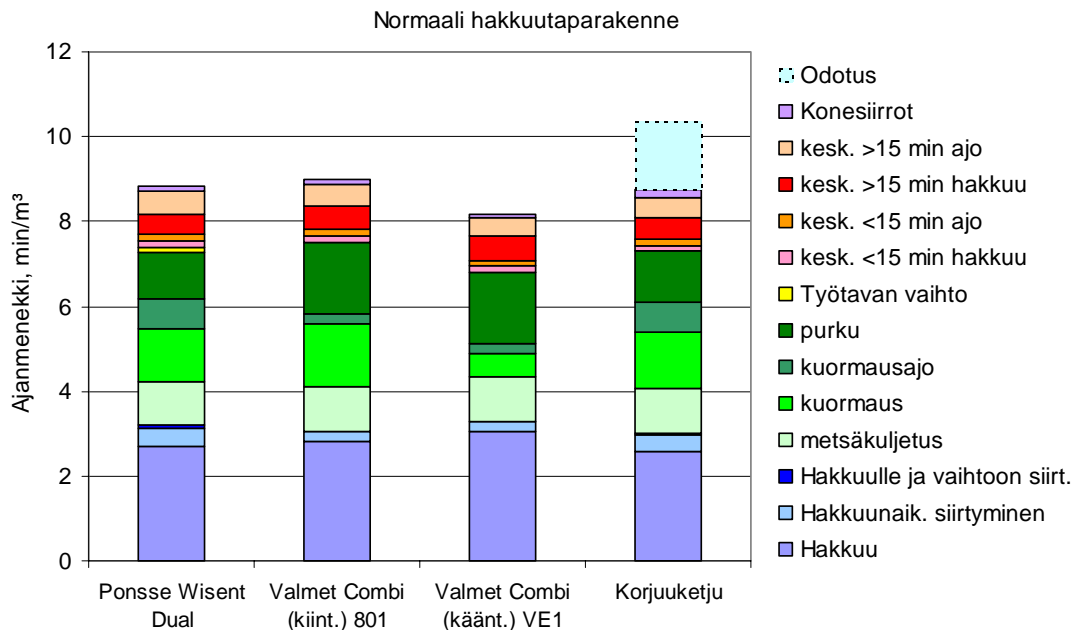
Tilanteissa, joissa leimikolla oli useampi korjuulohko, siirtokustannus jaettiin korjuulohkoittain hakkuukertymien suhteessa. Siten korjuukustannuksia voitiin tarkastella myös korjuulohkotasolla. Simulointimallista saaduilla korjuulohkojen korjuun käyttötuntiajanmenekillä ja edellä kuvatulla tavalla korjatuilla siirtokustannuksilla laskettiin konekonseptittain korjuukustannus kuutiometriä kohti kullekin lohkolle.

Hakkuun ja lähikuljetuksen tasapainoa korjuuketjulla tutkittiin leimikkotasolla molemmilla korjuualueilla. Tasapainotilatarkastelussa käytettyjen ajanmenekkimallien perusteella laskettiin jokaiselle perusleimikkosuman leimikolle ja molemmille korjuukoneille käyttötuntiajanmenekit. Lopullinen tarkasteltava suure oli konekonseptien ajanmenekkiero leimikolla. Analyysin perusteella voitiin arvioida, löytyykö korjuualueelta riittävästi epätasapainossa olevia ja tarpeeksi suuria leimikoita, jotta korjurin tuominen kolmantena koneena korjuuta tasapainottamaan olisi mielekästä.

3 Tulokset

3.1 Korjuukonseptien ajanmenekkirakenteet

Simulointitulosten ajanmenekkirakenteista tarkasteltiin yksityiskohtaisemmin kolmea korjuulohkopankkia; perusleimikkopankki, ensiharvennusleimikot ja alle 100 m³:n leimikot normaalilla hakkuutaparakenteella. Kuvissa 9 ja 10 on esitetty korjuukonsepteittain puunkorjuun ajanmenekkirakenteet perusleimikkopankin korjuutilanteessa sekä Saimaan että Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Vaikka Valmet Combi konsepteilla hakkuun ja kuormauksen aikaiset siirtymiset tapahtuvat samalla siirtymiskerralla, konseptien vertailtavuutta parantaakseen seuraavissa graafeissa työvaihe on jaettu tasan sekä hakkuun siirtymiseen että kuormauksen aikaiseen siirtymiseen.

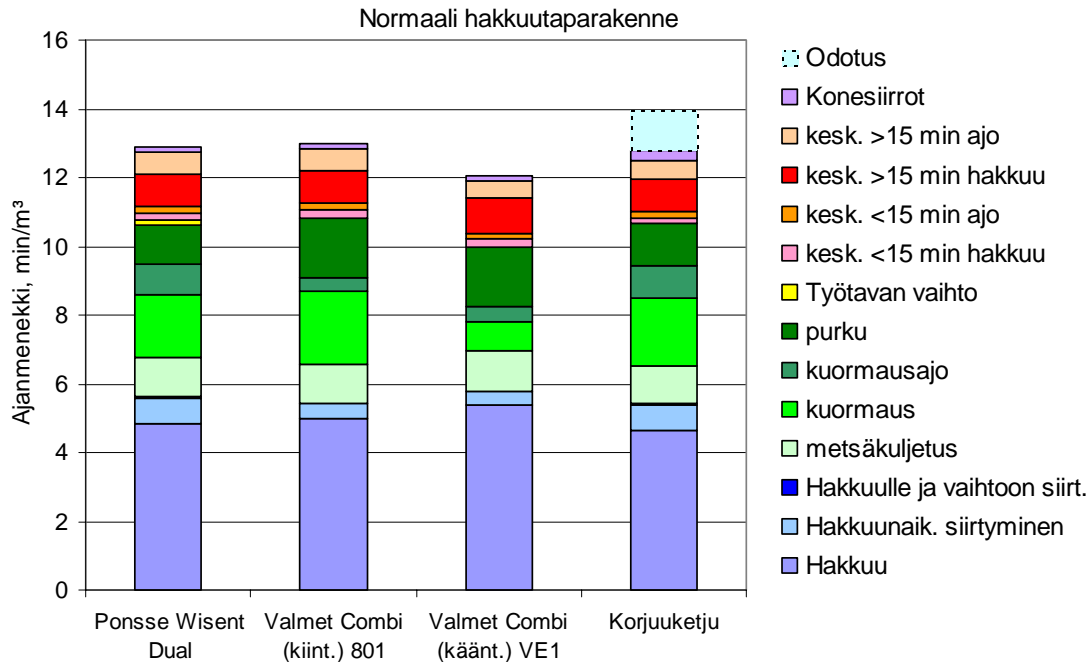


Kuva 9. Konekonseptien työaikajakauma (min/m³) normaalin hakkuutaparakenteen korjuulohkoilla Saimaan korjuualueella. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Molemmilla puunkorjuualueilla Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla osoittautui tuottavimmaksi korjuukonseptiksi. Korjuun ajanmenekki Saimaan ja Pohjois-Pohjanmaan korjuualueilla olivat merkittäviä; Saimaan alueeseen nähden Pohjois-Pohjanmaalla korjureiden ajanmenekit korjattua kuutiometriä kohden kasvoivat noin 41 % ja koneketjulla vastaava arvo oli 32 % (kuvat 8 ja 9). Selittävin tekijä ajanmenekin kasvuun oli Pohjanmaan selvästi pienempi keskirunkokoko (Saimaalla 0,35 m³ ja Pohjois-Pohjanmaalla 0,16 m³). Kokonaisajanmenekkiero syntyy pääasiassa hakkuun ajanmenekin lisäyksestä.

Selvimmät konekonseptien väliset ajanmenekkierot ilmenivät hakkuussa sekä kuormauksessa ja purkamisessa. Näissä työvaiheissa erityisesti Valmet Combi konsepteilla ajanmenekki oli muita konsepteja suurempi. Toisaalta yhdenaikaisessa hakkuu- ja kuormaus siirtymisessä säästyivät muihin konekonsepteihin vastaaviin erillisiin työvaiheisiin nähden aikaa. Ajansäästö oli noin puolet. Valmet Combin kääntyvän kuormatilan merkittävin etu muihin konsepteihin oli suorakuormauksen myötä saatu ajansäästö kuormauksessa (korjurin kuormausaika oli vain noin 40 - 45 % kuormatraktorin kuormausajasta). Tosin suorakuormaus lisäsi hieman hakkuuaikaa.

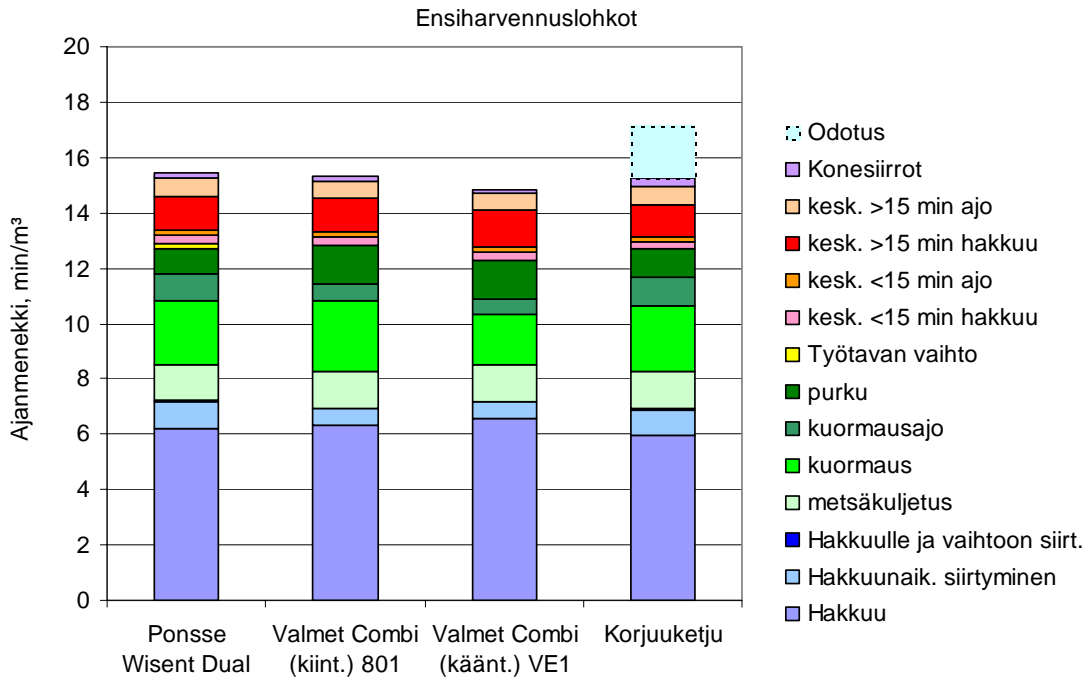
Korjuuketjulla mahdollisten odotusten osuus kokonaisajanmenekistä oli Saimaalla 14 % ja Pohjois-Pohjanmaalla 8 %. Tämä kertoo sen, että Pohjois-Pohjanmaalla hakkuukoneella ja kuormatraktorilla on hieman parempi tuottavuuksien tasapaino. Simulointimallin mukaan Saimaalla hakkuukoneen odotusaikaa on kuormatraktoria enemmän, kun taas Pohjois-Pohjanmaalla tilanne on päinvastainen. Odotuksiin sisältyy myös pieni osa pidemmistä konekeskeytyksistä aiheutuvaa odotusaikaa toiselle koneelle sekä mahdolliset koneenkuljetusauton odotukset (osuus noin 5 – 10 % koko odotusajasta). Vaikkakin simuloinnin tuloksissa odotusten ajanmenekit on esitetty, pääosin tuottavuuseroista johtuvia odotusaikoja voidaan vähentää merkittävästi koneiden työvuoro- ja työaikajärjestelyillä.



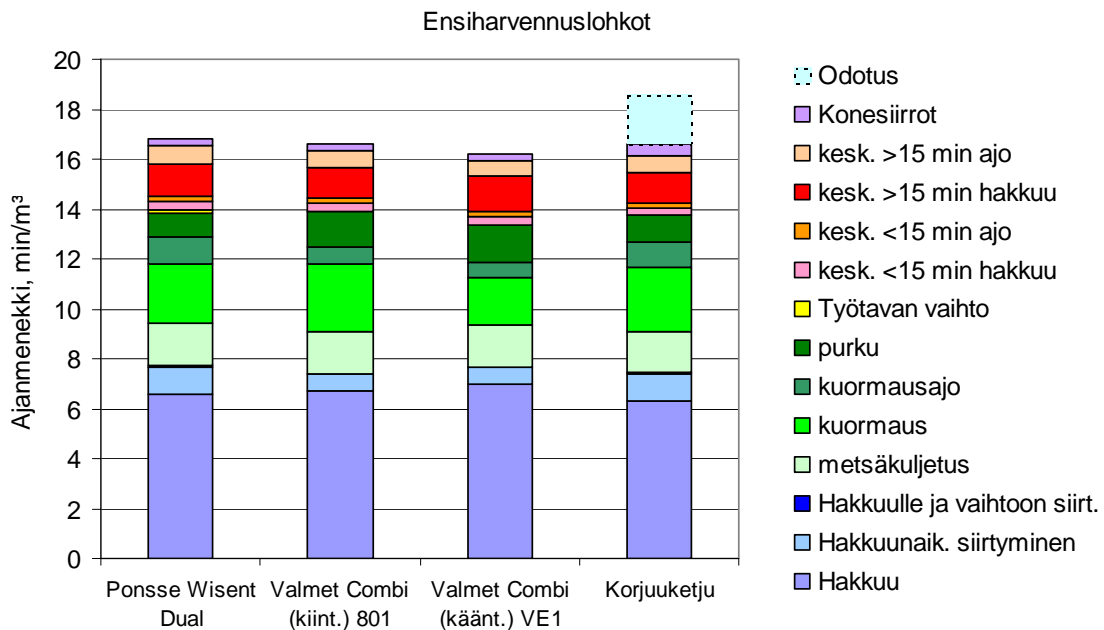
Kuva 10. Konekonseptien työaikajakauma (min/m³) normaalin hakkuutaparakenteen korjuulohkoilla Pohjanmaan hankinta-alueella. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Ensiharvennusleimikoilla konekonseptien puunkorjuun ajanmenekit ja konseptien väliset erot olivat hyvin samankaltaiset molemmilla korjuualueilla (kuvat 11 ja 12). Pohjois-Pohjanmaalla kaikilla konekonsepteilla ajanmenekin lisäys korjatulle puukuutiometrille oli noin 15 % Saimaan korjuualueeseen nähden. Toisaalta ensiharvennuskohteilla korjuun ajanmenekin kasvu normaaliin hakkuurakenteeseen nähden oli Saimaalla noin 108 % ja Pohjois-Pohjanmaalla noin 57 %. Ensiharvennuskohteilla hakkuun ajanmenekkiosuus oli selvästi normaalin hakkuutaparakenteen kohteita suurempi.

Myös kokonaisajanmenekin suhteen korjuukonseptien erot olivat hyvin pieniä. Ensiharvennuskohteilla rungon koon ollessa pientä korjurikonseptien hakkuun ajanmenekit eivät poikkea juurikaan hakkuukoneen ajanmenekistä. Kuitenkin Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla menettää hieman etuaan muihin konsepteihin nähden, sillä ensiharvennuksilla suorakuormauksen osuus vähenee merkittävästi. Kääntyvä kuormatilan konseptilla kuormauksen ajanmenekin osuus kuormatraktorin kuormausaikaan nähden oli jo 75 %. Simuloinnissa kääntyvän kuormatilan konseptille oli asetettu harvennuksille suorakuormausmahdollisuus 30 %:ssa tapauksista.



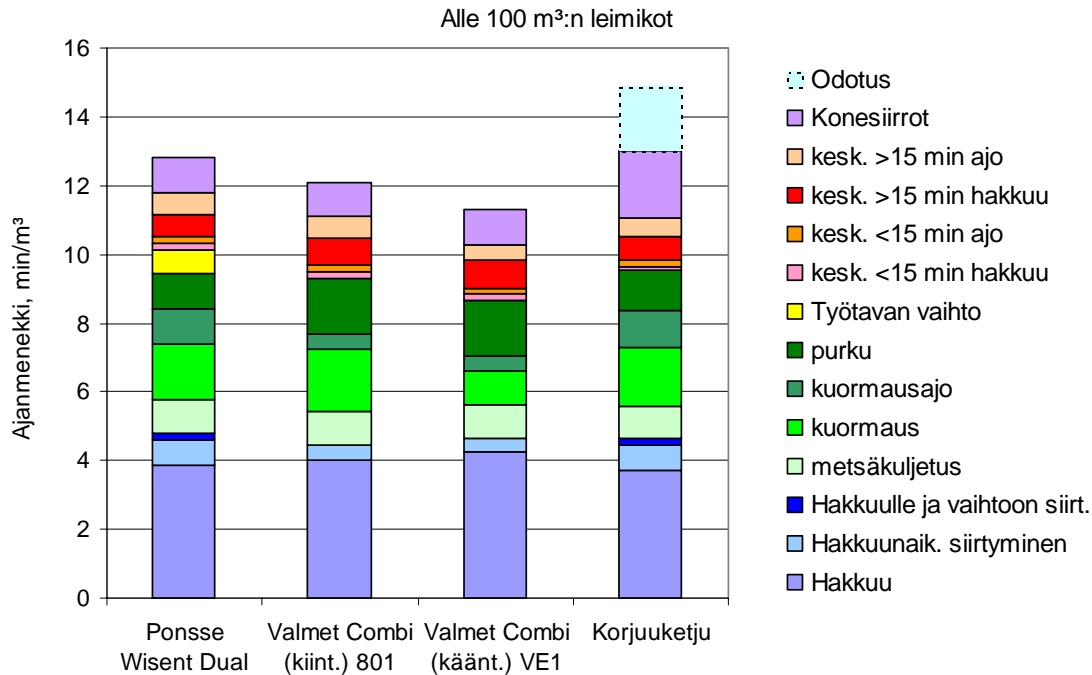
Kuva 11. Konekonseptien työaikajakauma (min/m³) ensiharvennuslohkoilla Saimaan hankinta-alueella. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.



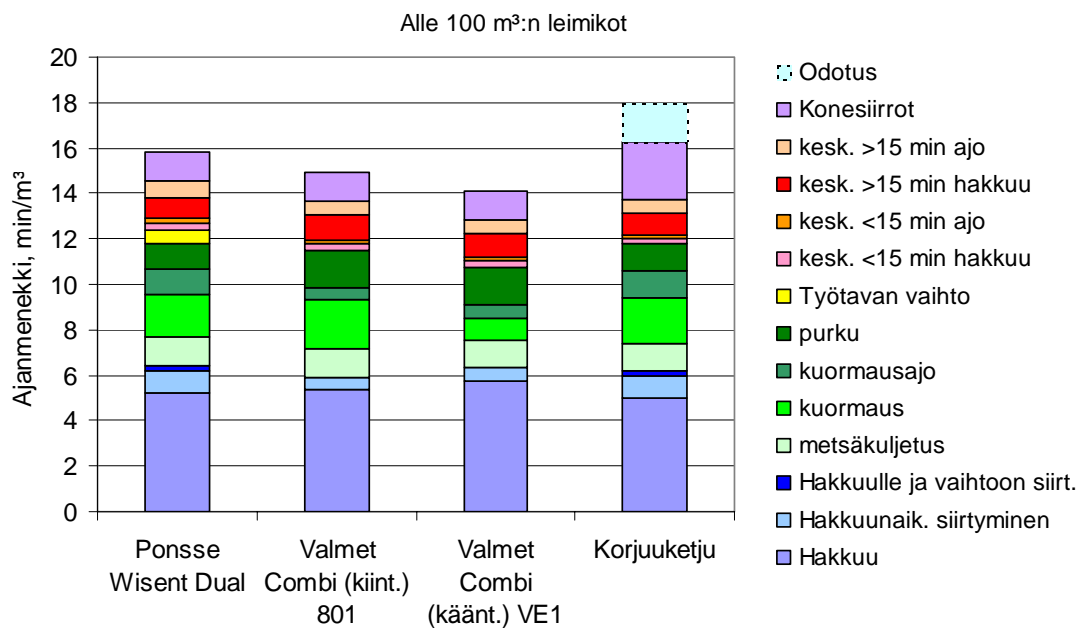
Kuva 12. Konekonseptien työaikajakauma (min/m³) ensiharvennuslohkoilla Pohjanmaan hankinta-alueella. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Alle 100 m³:n poistuman leimikoilla konesiirtojen ajanmenekkiosuus kasvoi merkittävästi (Kuvat 13 ja 14). Puunkorjuun kokonaisajasta siirtojen osuus oli noin 5 % korjureilla ja noin 10 % koneketjulla Saimaan korjuualueella. Pohjois-Pohjanmaalla vastaavat arvot olivat noin 0,5–1,0 prosenttiyksikköä suuremmat. Pääosin tästä johtuen korjureiden korjuun kokonaisajanmenekit olivat selvästi pienemmät kuin korjuuketjulla verrattaessa aiempiin leimikkopankkituloksiin. Siirtojen osalta on huomioitava, että osa siirtovalmisteluista kuului jo korjuun keskeytysaikoihin, joka vaikuttaa näissä tuloksissa vähentävästi siirron aikoihin.

Ponsse Dual konseptilla korjuun työtavan vaihdon ajanmenekin osuus kasvoi aiempiin leimikkopankkeihin nähden selvästi ja oli nyt noin 3–4 % korjuun kokonaisajasta. Keskimäärin jokaisessa leimikkopankissa keskeytysten osuus korjureilla korjuun kokonaisajasta vaihteli 8 %:sta 14 %:iin, kun taas koneketjulla keskeytysten osuus oli korjureihin nähden noin 2–3 prosenttiyksikköä pienemmät.



Kuva 13. Konekonseptien työaikajakauma (min/m³) alle 100 m³:n leimikoilla Saimaan hankinta-alueella. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.



Kuva 14. Konekonseptien työaikajakauma (min/m³) alle 100 m³:n leimikoilla Pohjanmaan hankinta-alueella. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

3.2 Korjuukonseptien käyttöasteet, tuottavuudet ja tuntikustannukset

Korjuulohkopankkien simulointiajojen korjuutuloksia toiminnallisen käyttöasteen, tuottavuuden sekä käyttötuntikustannuksen osalta on esitetty taulukoissa 20 ja 21. Tuntikustannusten suuri vaihtelu saman konekonseptin osalta eri korjuupankeissa selittyy mm. käyttöasteen sekä koneiden siirtojen muutoksista. Erityisesti korjuukohteiden keskimääräisen poistuman vähetessä kone-siirtojen osuus korjuun kokonaisajanmenekistä kasvaa ja siten koneen toiminnallinen käyttöaste pienenee. Valmet Combi 801:n tuntikustannus (kääntyvällä kuormatilalla) oli 3-6 € suurempi verrattaessa vastaavan konseptin kiinteään kuormatilamalliin. Toisaalta suurimmat tuottavuudet oli Valmetin korjuukonseptilla kääntyvällä kuormatilalla.

Taulukko 20. Toiminnallinen käyttöaste (KA, %), tuottavuus (m³/h-E₁₅) ja käyttötuntikustannus (€/h-E₁₅) konekonseptittain kaikille tutkimuksen korjuulohkopankeille Saimaan korjuualueella, kun vuotuinen koneen käyttöaika on 2 500 tuntia.

Korjuulohkopankit	Ponsse Wisent Dual, Buffalo Dual			Valmet Combi 801 kiinteä kuormatila			Valmet Combi 801 kääntyvä kuormatila, VE 1 ¹			Korjuuketju ² ilman odotuksia, odotusten kanssa			
	KA, %	m ³ /h	€/h	KA, %	m ³ /h	€/h	KA, %	m ³ /h	€/h	KA, %	m ³ /h	MOTO	AJO
1. Perusleimikot	85,7	7,9	74,7	87,0	7,7	77,6	86,5	8,5	80,2	85,5	8,2	82,1	57,0
		8,1	76,1							73,0		92,4	57,9
2. Päätehakkuu	85,6	10,2	74,7	86,9	9,6	77,4	86,2	11,1	80,6	85,5	11,1	83,5	57,2
		10,4	76,0							68,4		102,5	57,3
3. Harvennukset	86,0	5,1	75,4	86,7	5,0	78,4	86,7	5,2	80,1	86,1	5,1	81,4	57,5
		5,2	76,6							78,7		83,5	60,0
4. Ylispuuhakkuu	79,6	9,6	82,6	82,6	9,8	85,0	81,3	11,1	89,3	79,0	10,6	100,8	67,3
		9,9	84,0							62,9		121,4	67,7
5. Ensiharv	85,7	4,5	75,8	87,0	4,5	78,6	86,2	4,7	80,0	85,7	4,6	80,7	57,7
		4,6	77,0							76,5		80,8	64,1
6. < 50 m ³	68,5	5,7	104,3	76,1	6,1	105,9	72,9	6,5	110,9	63,8	5,7	129,3	107,0
		5,8	105,9							54,5		136,9	111,0
7. < 100 m ³	76,7	6,1	89,4	80,0	6,2	91,6	79,8	6,7	94,3	74,3	6,1	104,7	80,4
		6,2	90,8							66,0		109,3	83,3
8. < 200 m ³	81,0	6,5	82,0	83,6	6,5	84,3	83,2	7,0	86,7	79,8	6,6	92,8	67,9
		6,6	83,3							71,1		97,3	70,2
9. < 100 m ³ harv.	79,8	5,0	86,3	80,1	5,0	89,5	82,1	5,3	90,6	75,4	5,0	98,7	78,3
		5,0	87,6							70,2		99,5	81,9

¹Valmet Combi 801 (kääntyvä kuormatila) VE1: kuormatilaan puinti 30 % harvennuksilla, muualla 90 % sekä +15 % lisäaikaa hakkuutyöhön

² Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

Taulukko 21. Toiminnallinen käyttöaste (KA, %), tuottavuus (m³/h-E₁₅) ja käyttötuntikustannus (€/h-E₁₅) konekonseptitain kaikille tutkimuksen korjuulohkopankeille Pohjanmaan korjuualueella, kun vuotuinen koneen käyttöaika on 2 500 tuntia.

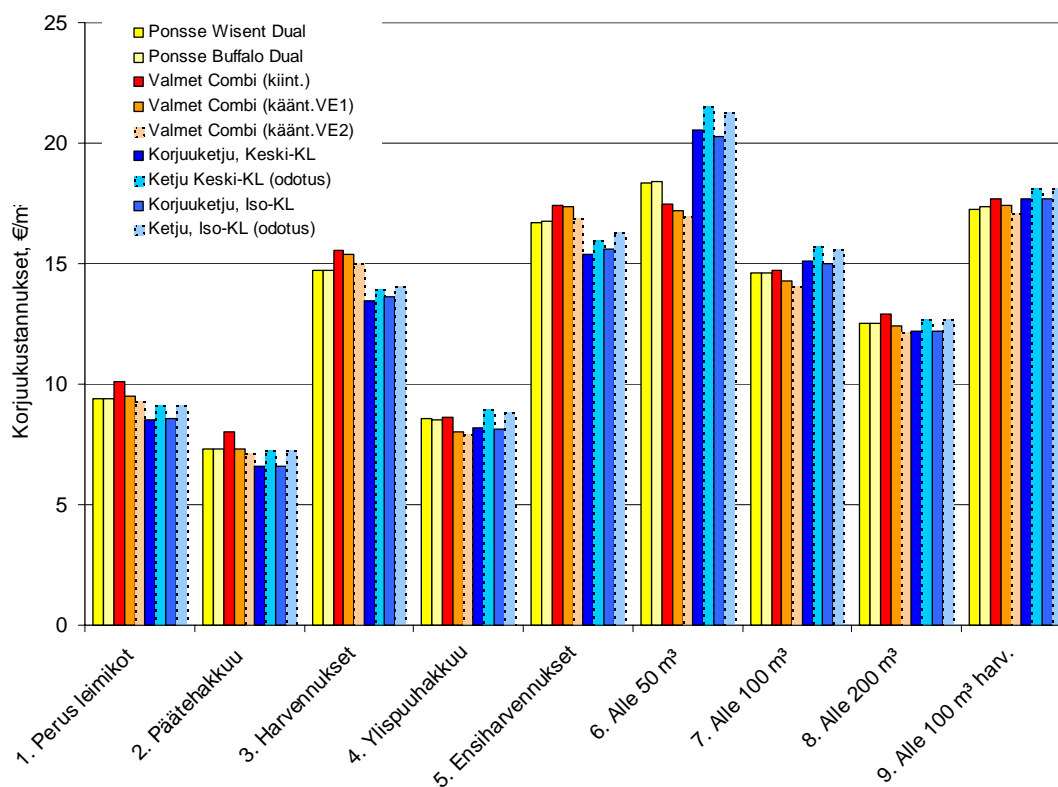
Korjuulohkopankit	Ponsse Wisent Dual, <i>Buffalo Dual</i>			Valmet Combi 801 kiinteä kuormatila			Valmet Combi 801 kääntyvä kuormatila, VE 1 ¹			Korjuuketju ² ilman odotuksia, odotusten kanssa			
	KA, %	m ³ /h	€/h	KA, %	m ³ /h	€/h	KA, %	m ³ /h	€/h	KA, %	m ³ /h	MOTO	AJO
1. Perus leimikot	85,7	5,4	75,4	86,5	5,3	78,3	86,1	5,8	81,5	85,5	5,5	81,1	57,5
		5,5	76,8							78,6		82,4	60,9
2. Pääte-hakkuu	85,5	6,4	75,6	86,1	6,2	78,5	85,4	7,0	82,2	85,4	6,3	82,0	57,8
		6,5	76,9							78,9		84,3	59,8
3. Harvennukset	85,9	4,5	75,7	86,4	4,5	78,7	86,7	4,7	81,3	85,5	4,6	81,3	58,3
		4,6	77,1							77,1		81,6	63,7
4. Ylispuu-hakkuu	82,7	6,2	79,8	83,4	6,2	82,8	82,6	7,0	87,0	79,6	6,2	89,6	66,0
		6,3	81,3							71,8		92,4	69,0
5. Ensiharv	85,7	4,2	76,1	87,1	4,2	78,8	85,8	4,3	81,9	84,9	4,3	81,8	59,0
		4,2	77,5							76,4		82,0	64,7
6. < 50 m ³	70,3	4,8	101,8	72,0	5,0	105,3	72,7	5,4	109,3	61,2	4,8	123,7	110,5
		4,9	103,5							55,8		126,5	114,7
7. < 100 m ³	77,3	4,9	88,2	80,1	5,0	90,6	79,3	5,4	94,7	73,2	4,9	101,4	81,5
		5,0	89,7							67,7		102,7	85,1
8. < 200 m ³	81,1	5,1	81,6	83,7	5,1	83,9	83,2	5,4	87,4	79,5	5,1	90,4	68,8
		5,1	83,0							73,5		91,1	72,6
9. < 100 m ³ harv.	77,6	4,3	87,9	81,1	4,4	90,1	80,2	4,5	93,4	72,6	4,4	99,9	83,3
		4,3	89,5							67,7		100,4	87,5

¹Valmet Combi 801 (kääntyvä kuormatila) VE1: kuormatilaan puinti 30 % harvennuksilla, muualla 90 % sekä +15 % lisääaikaa hakkuutyöhön

²Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

3.3 Korjuun yksikkökustannukset

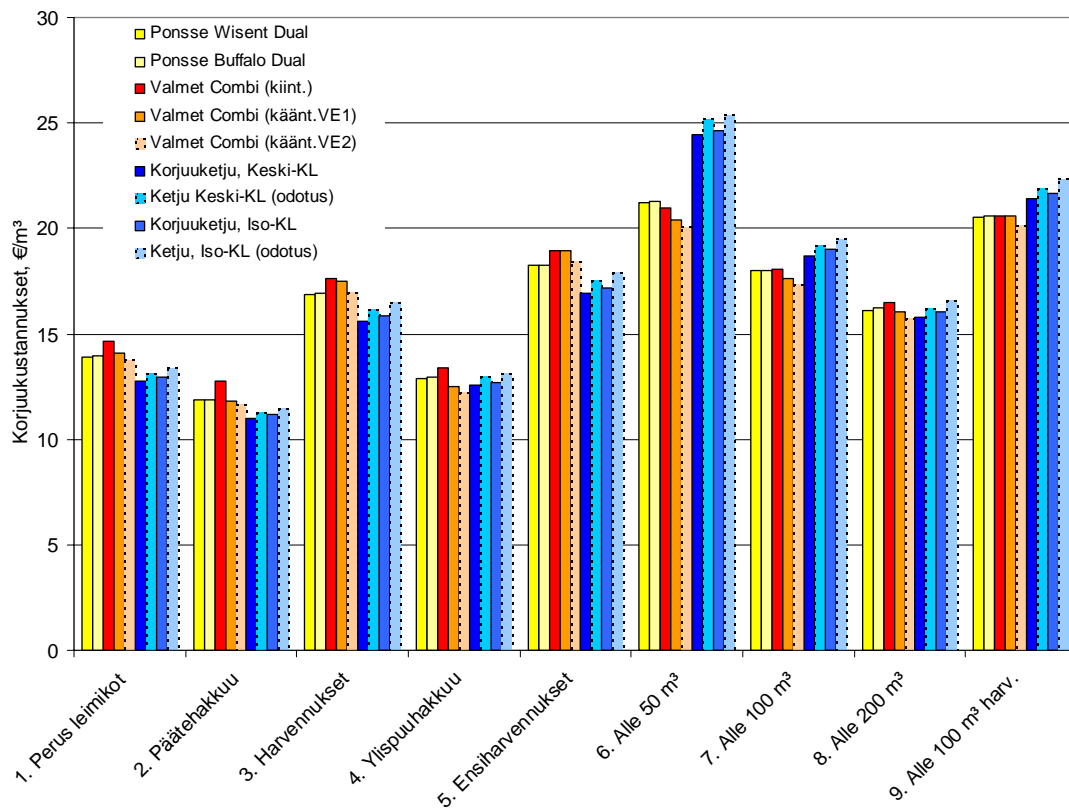
Koneketju oli taloudellisin korjuukonsepti normaalin hakkuutaparakenteen kohteilla sekä pääte-hakkuu- ja harvennuskohdeilla (Kuvat 15 ja 16 sekä taulukot 22 ja 23). Korjuulohkopankkikohtaisesti koneketjun koneiden odotusajan huomiointi korjuukustannuksiin lisäsi yksikkökustannuksia 0,37 € - 1,78 € Ensiharvennuskohdeilla kuormatraktorin selvästi suurempi tuottavuus aiheutti suurimman odotusajan ja -kustannuksen. Tehokkaalla työvuorojärjestelyllä odotusaikaa voidaan vähentää. Kustannuksissa päästäneen käytännössä lähemmäs kustannusarvoja, jotka eivät sisällä odotuskustannusta.



Kuva 15. Konekonseptien korjuukustannukset korjuulohkopankeittain Saimaan hankinta-alueella. Korjuuketjuissa kaksi kokoluokkaa (Keski-KL = hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone, Iso-KL = hakkuukoneena yleiskone ja kuormatraktorina päätehakkuukone).

Taulukko 22. Konekonseptien korjuukustannukset korjuulohkopankeittain Saimaan hankinta-alueella. Korjuuketjuissa kaksi kokoluokkaa (Keski-KL = hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone, Iso-KL = hakkuukoneena yleiskone ja kuormatraktorina päätehakkuukone).

Korjuupankit	Ponsse Wisent Dual	Ponsse Buffalo Dual	Valmet Combi (kiint.)	Valmet Combi (käänt.VE1)	Valmet Combi (käänt.VE2)	Korjuuketju Keski-KL	Korjuuketju Keski-KL (odotus)	Korjuuketju Iso-KL	Korjuuketju Iso-KL (odotus)
1. Perus leimikot	9,41	9,40	10,09	9,52	9,31	8,51	9,10	8,62	9,16
2. Päätehakkuu	7,29	7,28	8,05	7,28	7,15	6,57	7,24	6,64	7,27
3. Harvennukset	14,73	14,75	15,57	15,40	14,98	13,47	13,93	13,68	14,11
4. Ylispuuhakkuu	8,55	8,52	8,64	8,04	7,90	8,19	8,97	8,28	8,99
5. Ensiharvennus	16,68	16,74	17,43	17,34	16,87	15,36	16,00	15,66	16,38
6. < 50 m³	18,35	18,40	17,49	17,18	16,96	20,54	21,55	20,91	21,91
7. < 100 m³	14,59	14,64	14,74	14,30	14,07	15,09	15,70	15,32	15,92
8. < 200 m³	12,52	12,55	12,92	12,43	12,15	12,18	12,70	12,34	12,85
9. < 100 m³ harv.	17,28	17,35	17,70	17,43	17,06	17,72	18,14	18,00	18,48



Kuva 16. Konekonseptien korjuukustannukset korjuulohkopankeittain Pohjanmaan hankinta-alueella. Korjuuketjuissa kaksi kokoluokkaa (Keski-KL = hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone, Iso-KL = hakkuukoneena yleiskone ja kuormatraktorina päätehakkuukone).

Taulukko 23. Konekonseptien korjuukustannukset korjuulohkopankeittain Pohjanmaan hankinta-alueella. Korjuuketjuissa kaksi kokoluokkaa (Keski-KL = hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone, Iso-KL = hakkuukoneena yleiskone ja kuormatraktorina päätehakkuukone).

Korjuupankit	Ponsse Wisent Dual	Ponsse Buffalo Dual	Valmet Combi (kiint.)	Valmet Combi (käänt.) VE1	Valmet Combi (käänt.) VE2	Korjuuketju Keski-KL	Korjuuketju Keski-KL (odotus)	Korjuuketju Iso-KL	Korjuuketju Iso-KL (odotus)
1. Perus leimikot	13,88	13,93	14,67	14,09	13,79	12,75	13,15	12,98	13,40
2. Päätehakkuu	11,85	11,89	12,75	11,82	11,66	10,96	11,30	11,17	11,52
3. Harvennukset	16,86	16,93	17,64	17,48	17,02	15,59	16,17	15,87	16,49
4. Ylispuuhakkuu	12,90	12,93	13,37	12,51	12,27	12,56	13,04	12,69	13,16
5. Ensiharvennus	18,23	18,26	18,97	18,94	18,41	16,90	17,54	17,20	17,92
6. < 50 m³	21,23	21,31	20,99	20,42	20,05	24,46	25,19	24,61	25,42
7. < 100 m³	17,97	18,03	18,08	17,61	17,37	18,68	19,17	18,98	19,51
8. < 200 m³	16,13	16,20	16,51	16,05	15,75	15,80	16,23	16,07	16,60
9. < 100 m³ harv.	20,52	20,61	20,62	20,59	20,14	21,41	21,91	21,69	22,34

3.4 Korjuukustannusten ennustemallit korjuulohkelle

Korjuukonsepteille laadittiin korjuulohkon korjuukustannusten ennustemallit sekä harvennuskohteille että muille hakkuukohteille, kun ennustemallien aineistona oli perusleimikkopankkien korjuulohkot sekä niille lasketut korjuulohkoittaiset korjuukustannukset. Jokaisen korjuukonseptin ennustemallit olivat alla esitetyn regressiomallin mukaisia. Korjuukonseptien korjuukustannusmallien parametrien arvot sekä muut tilastolliset suureet hakkuutavoittain ja korjuualueittain on esitetty liitteessä 3. Korjuukonseptista riippuen korjuukustannusmallien selitysasteiden vaihteluväli oli 88,0–97,1 %.

$$K_{\text{kustannus}} = b_0 + b_1 \times x_{\text{rkoko}}^z + b_2 \times x_{\text{mekumatka}} + b_3 \times \frac{1}{x_{\text{kertymä}}} + b_4 \times LN(x_{\text{ajouratiheys}}) + b_5 \times x_{\text{siirtomatka}}$$

missä,

$K_{\text{kustannus}}$ = korjuulohkon korjuukustannus, €/m³

x_{rkoko} = keskirunkokoko, m³

$x_{\text{mekumatka}}$ = metsäkuljetusmatka, m

$x_{\text{kertymä}}$ = leimikon kokonaiskertymä, m³

$x_{\text{ajouratiheys}}$ = ajouravarsitiheys, m³/100m

$x_{\text{siirtomatka}}$ = korjuukonseptin siirtomatka, km

b_0 = mallin vakiotermi

$b_1 - b_5$ = mallin kertoimet (korjuukonsepti-, hakkuutapa - ja korjuualuekohtainen)

z = rungon koon potenssi (korjuukonsepti-, hakkuutapa - ja korjuualuekohtainen)

Taulukko 24. Saimaan korjuualueen korjuukustannusmallin selitysasteen kasvu, kun merkitsevä muuttuja ($p < 0,001$) lisätään malliin. Suluissa esitetty muuttujien valintajärjestys lopulliseen regressiomalliin (askeltava regressioanalyysi, stepwise).

Muuttuja	Mallin selitysasteen kasvu, prosenttiyksikköä (muuttujan valintajärjestys malliin)							
	Ponsse Wisent Dual		Valmet Combi kiinteä ktl.		Valmet Combi kääntyvä ktl. ¹		Korjuuketju ²	
	Harv.	Muu	Harv.	Muu	Harv.	Muu	Harv.	Muu
Rungon koon potenssimuoto	71,8 (1)	42,0 (1)	81,6 (1)	60,1 (1)	80,5 (1)	54,5 (1)	72,9 (1)	30,6 (2)
Metsäkuljetusmatka	11,3 (2)	19,6 (2)	11,2 (2)	19,8 (2)	12,2 (2)	23,6 (2)	7,3 (3)	9,8 (3)
Poistuman käänteisluku	3,1 (4)	9,3 (4)	3,1 (3)	12,2 (3)	3,0 (3)	14,4 (3)	9,0 (2)	45,3 (1)
Ajouravarsitiheyden luonnonlogaritmi	6,5 (3)	17,1 (3)	1,1 (4)	1,0 (4)	1,2 (4)	1,3 (4)	5,4 (4)	6,3 (4)
Siirtomatka	0,1 (5)	0,1 (5)	0,0 (5)	0,2 (5)	0,0 (5)	0,2 (5)	0,4 (5)	0,4 (5)
Mallin selitysaste, %	92,8	88,0	97,1	93,2	96,9	93,9	95,0	92,4

¹Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla (VE1), suorakuormausta harvennuksilla 30 % ja muualla 90 %

²Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

Taulukoissa 24 ja 25 voidaan havaita korjuukustannusmallin muuttujien vaikutukset mallin selitysasteen kasvuun, kun kukin muuttuja lisättiin malliin yksitellen. Rungon koon vaihtelulla oli selvästi suurin vaikutus korjuukustannusten vaihteluun kaikilla korjuukonsepteilla. Rungon koon selitti 31 %:sta 82 %:iin koko korjuukustannusten vaihtelusta selitysasteen vaihdelta suu-

resti korjuukonsepteittain. Kuitenkin korjuukonseptikohtaisia eroja voitiin havaita eri muuttujien vaikutusten osalta.

Korjuuketjulla korjuukohteen poistuman vaikutus korjuukustannukseen on selvästi merkittävämpi kuin muilla korjuukonsepteilla. Tarkastellussa aineistossa korjuuketjulla korjuukohteen poistuma selittääkin usein rungon koon jälkeen seuraavaksi eniten korjuukustannusten vaihtelusta, kun taas korjureilla metsäkuljetusmatka selittää poistumaa enemmän. Toiseksi korjuukonsepteja erottavaksi tekijäksi voidaan tulkita ajouravarsitiheys. Valmet Combi konseptien osalta ajouravarsitiheyden muutoksella ei ollut kovinkaan suurta vaikutusta korjuukustannusten vaihteluun, kun taas Ponsse Dualilla ja korjuuketjulla sen vaikutus oli selvästi merkittävämpää (taulukot 24 ja 25). Vaikka siirtomatka osoittautui tilastollisesti merkitseväksi muuttujaksi jokaisen korjuukonseptin kustannusmalliin, siirtomatka selitti vain vähän korjuukustannusmallin vaihtelusta (alle 1 %).

Taulukko 25. Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen korjuukustannusmallin selityksasteen kasvu, kun merkitsevä muuttuja ($p < 0,001$) lisätään malliin. Suluissa esitetty muuttujien valintajärjestys lopulliseen regressiomalliin (askeltava regressioanalyysi, stepwise).

Muuttuja	Mallin selityksasteen kasvu, prosenttiyksikköä (muuttujan valintajärjestys malliin)							
	Ponsse Wisent Dual		Valmet Combi kiinteä ktl.		Valmet Combi kääntyvä ktl. ¹		Korjuuketju ²	
	Harv.	Muu	Harv.	Muu	Harv.	Muu	Harv.	Muu
Rungon koon potenssimuoto	66,7 (1)	62,9 (1)	76,8 (1)	75,6 (1)	76,6 (1)	74,1 (1)	56,8 (1)	51,6 (1)
Metsäkuljetusmatka	10,1 (2)	9,4 (3)	9,8 (2)	10,3 (2)	10,1 (2)	11,2 (2)	6,1 (3)	5,1 (4)
Poistuman käänteisluku	9,1 (3)	5,8 (4)	7,8 (3)	8,6 (3)	7,4 (3)	8,9 (3)	24,4 (2)	29,2 (2)
Ajouravarsitiheyden luonnonlogaritmi	5,6 (4)	15,5 (2)	1,1 (4)	1,1 (4)	1,4 (4)	1,5 (4)	4,5 (4)	6,6 (3)
Siirtomatka	0,1 (5)	0,1 (5)	0,3 (5)	0,3 (5)	0,2 (5)	0,2 (5)	1,0 (5)	0,9 (5)
Mallin selityksaste, %	91,6	93,7	95,8	95,8	95,6	95,9	92,8	93,4

¹Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla (VE1), suorakuormaus harvennuksilla 30 % ja muualla 90 %

² Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

Korjuukonseptien korjuukustannusmalleilla esitettiin korjuukustannukset jokaisen selittävän muuttujan suhteen molemmille korjuualueille (kuvat 17–26). Kunkin muuttujan vaikutus korjuukustannuksiin esitettiin siten, että muihin kustannusmallin selittäviin muuttujiin käytettiin korjuukohteiden keskimääräisiä arvoja (taulukko 26).

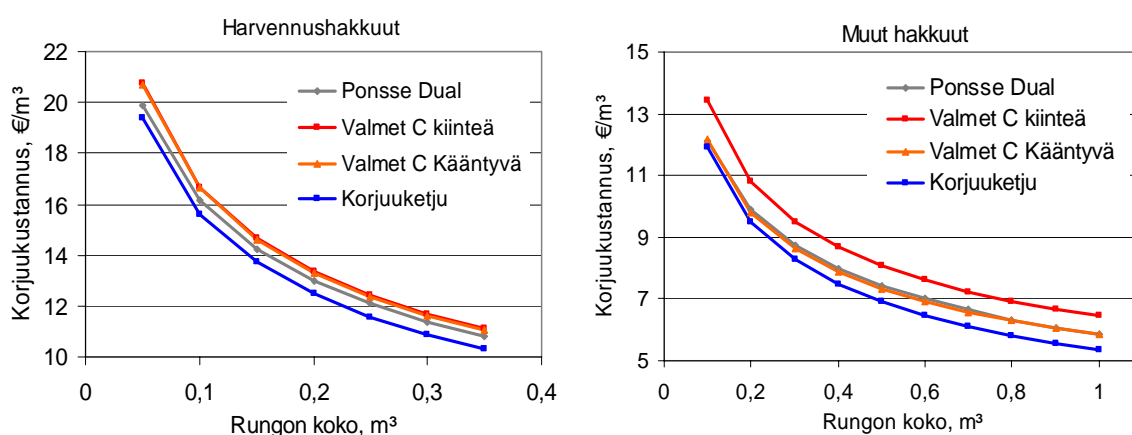
Taulukko 26. Korjuukustannusmallitarkastelussa käytetyt muuttujakeskiarvot.

Muuttuja	Korjuukohteiden muuttujakeskiarvot			
	Saimaan korjuualue		Pohjois-Pohjanmaan korjuualue	
	Harvennukset	Muut hakkuut	Harvennukset	Muut hakkuut
Runkokoko, m ³	0,15	0,44	0,11	0,16
metsäkuljetusmatka, m	398	304	366	324
lohkon poistuma, m ³	198	362	261	332
ajouravarsitiheys, m ³ /100m	10,7 (8,5 – 14,3) ¹	30,7 (21,5 – 37,2) ¹	9,4 (7,0 – 13,0) ¹	15,9 (12,4 – 21,8) ¹
siirtomatka leimikolle, km	20	18,4	29,1	30,4

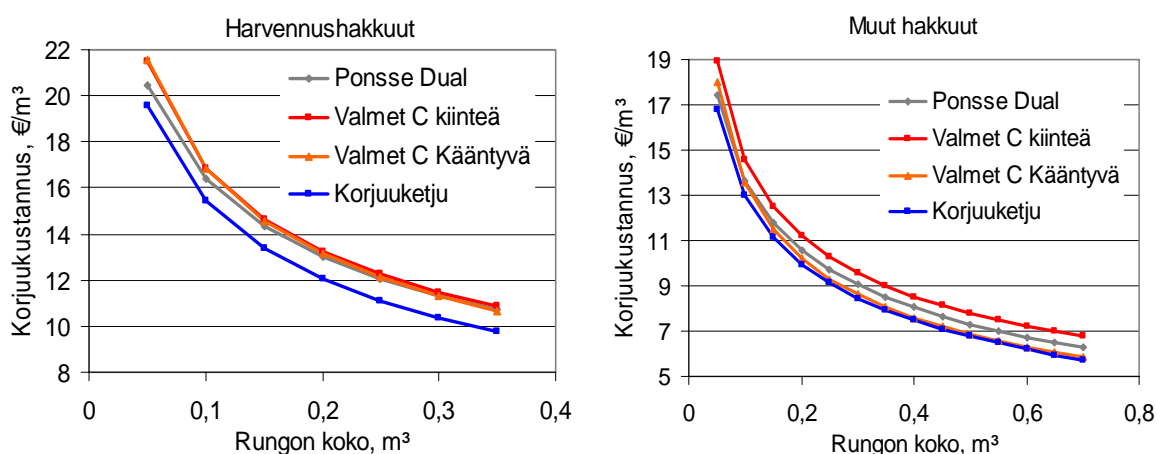
¹ Ajouravarsitiheyden vaihteluväli tarkasteltaessa korjuukustannuksia rungon koon funktiona

Sekä Saimaan että Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen tarkasteluissa korjuuketjun kustannustason huomioitiin 1/3-osa kaikista koneiden maksimiodotusajoista (simulointiajot odotuksilla). Näin ollen Saimaan korjuualueen osalta korjuuketjun korjuukustannustaso kasvoi kahdella prosentilla ja vastaavasti Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen kustannustaso kasvoi yhdellä prosentilla.

Perinteinen korjuuketju osoittautui edullisimmaksi korjuumenetelmäksi rungon koon koko tarkasteluvälillä kaikissa tarkastelukohdissa (kuvat 17 ja 18). Harvennuskohteilla korjureista Ponsse Dual osoittautui edullisimmaksi korjurikonseptiksi, kun taas muilla (pääosin päätehakkukohteet) korjuukohteilla Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla oli edullisin korjuri. Pohjanmaan muilla korjuukohteilla Valmet Combin (kääntyvä ktl.) korjuukustannukset olivat likimain korjuuketjun kustannuksia.

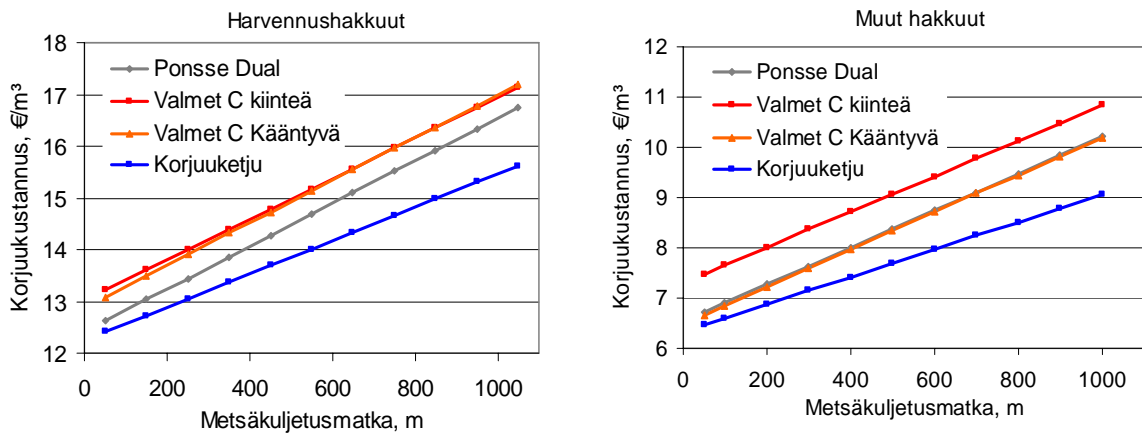


Kuva 17. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille rungon koon funktiona Saimaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 2 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

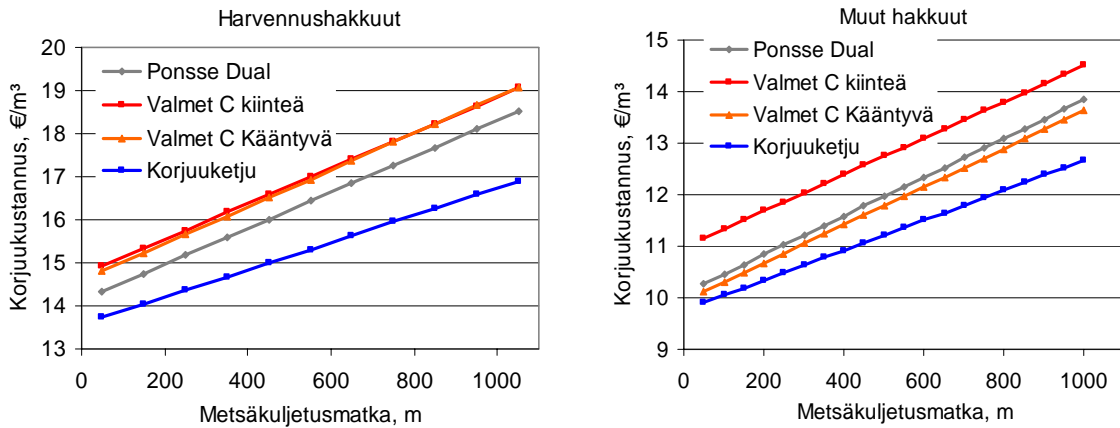


Kuva 18. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille rungon koon funktiona Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 1 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Metsäkuljetusmatkan kasvaessa korjuukustannusten kasvu korjureilla oli hieman korjuuketjua suurempaa; 100 metrin lähikuljetusmatkan lisäys lisäsi korjureiden kustannuseroa korjuuketjuun nähden noin 0,1 €kuutiometrille (kuvat 19 ja 20). Harvennuskohteilla Ponsse Dual oli Valmet Combi konseptiä edullisempi, kun taas muilla kohteilla kääntyvän kuormatilan ja suorakuormauksen hyödyt tulivat paremmin esille.

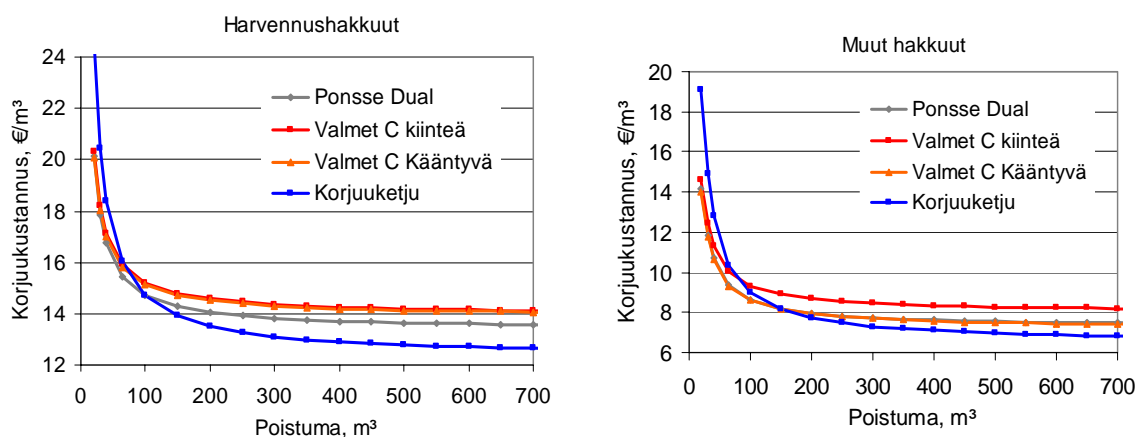


Kuva 19. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille metsäkuljetusmatkan funktiona Saimaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 2 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

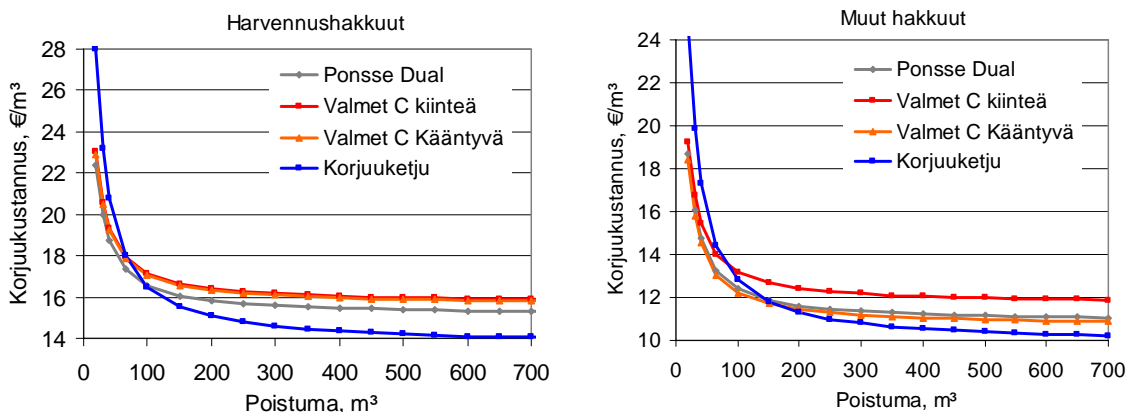


Kuva 20. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille metsäkuljetusmatkan funktiona Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 1 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Pienillä leimikon (1 tai useampia korjuulohkoja) poistumilla havaittiin korjureiden edullisuus korjuuketjuun nähden (kuvat 21 ja 22). Harvennushakkuissa Valmetin konseptit olivat korjuuketjua edullisempia alle 80 m³:n korjuukohteilla, kun taas Ponsse Dual oli edullisempi 110–115 m³:in asti. Sitä vastoin muilla hakkuukohteilla Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla sekä Ponsse Dual olivat korjuuketjua edullisempia alle 155–190 m³:n korjuukohteilla. Vastaavasti muilla hakkuukohteilla Valmetin kiinteän kuormatilan kilpailukyky korjuuketjuun nähden säilyi 80–90 m³:iin asti. Pohjois-Pohjanmaan korjuukohteilla korjureiden kilpailukyky säilyi hieman Saimaan aluetta suuremmilla korjuukohteilla (noin 5–20 m³ suuremmat poistumat). Muilla kohteilla Ponsse Dualin ja Valmet Combi kääntyvän kuormatilan kustannuskäyrät olivat hyvin samankaltaisia.

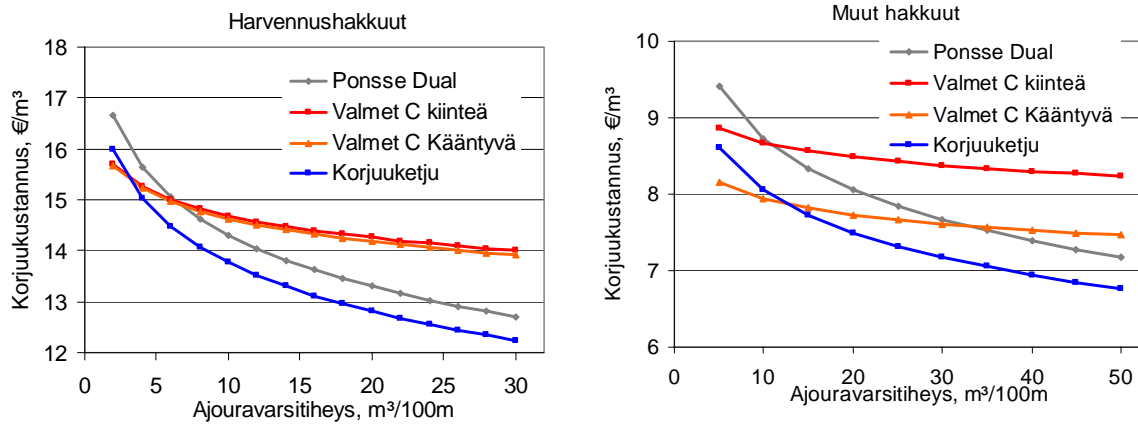


Kuva 21. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille korjuukohteen poistuman funktiona Saimaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 2 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

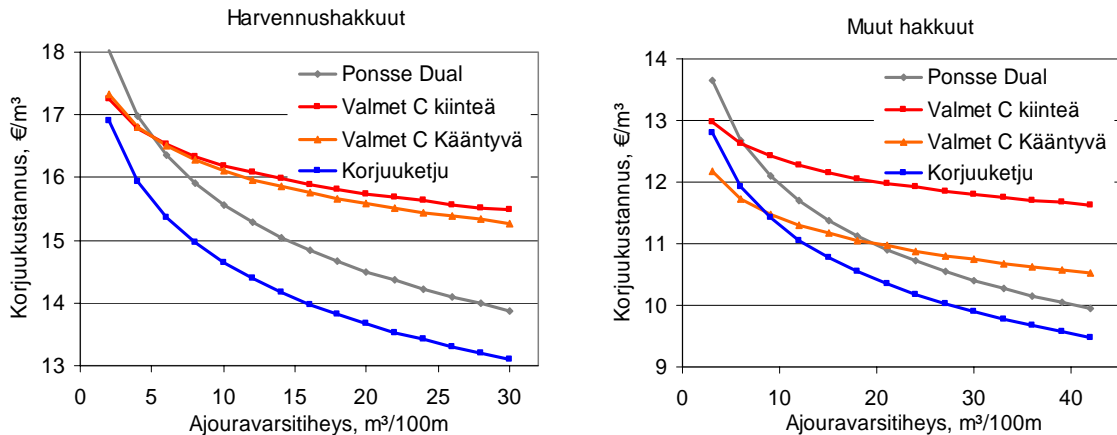


Kuva 22. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille leimikon poistuman funktiona Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 1 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Valmet Combi konsepteilla samanaikaisen hakkuun ja kuormauksenaikaisen siirtymisen hyöty tuli esille pienillä ajouravarsitiheyksillä (kuvat 23 ja 24). Saimaan harvennuskohteilla kun ajouravarsitiheys oli alle 4,5 m³ sadalle metrille (vastasi noin 25m³/ha), Valmet Combi konseptit olivat korjuuketjua edullisempia. Ponsse Dualiin nähden Valmet Combi konseptien kannattavuusetu jatkui 6,5 m³:iin sadalle metrille (vastasi noin 36 m³/ha). Pohjois-Pohjanmaan harvennuksilla kilpailukykyraja Combi konseptien ja korjuuketjun välillä tuli vastaan hieman pienemmillä ajouravarsitiheyksillä. Muilla hakkuukohteilla – jotka muuttuja keskiarvoina vastasivat pääosin päätehakkuita – pienellä ajouravarsitiheydellä (alle 9–15m³/100m, vastaa 70–116 m³/ha) oli merkittävää hyötyä Combi konsepteista vain kääntyvälle kuormatilalle. Siksi useimmat ylispuiden poistokohteet (joissa hehtaari-poistuma on vähäinen) oli edullisempaa korjata kääntyvän kuormatilan Combi-konseptilla. Korjuualueesta riippuen muilla hakkuukohteilla Combin kääntyvän kuormatilan kilpailukyky Ponsse Dualiin nähden oli parempi alle 20–30m³/100m ajouravarsitiheyksillä.



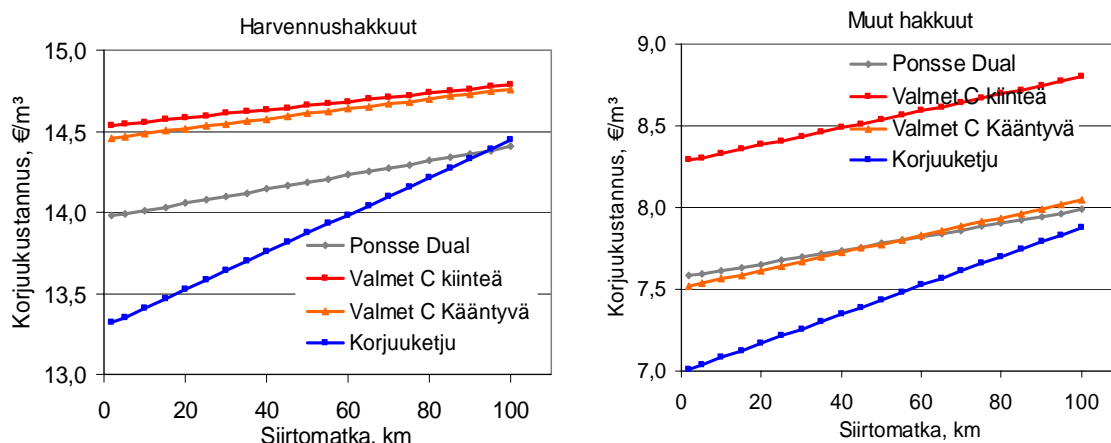
Kuva 23. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille korjuukohteen ajouravarsitiheyden funktiona Saimaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 2 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.



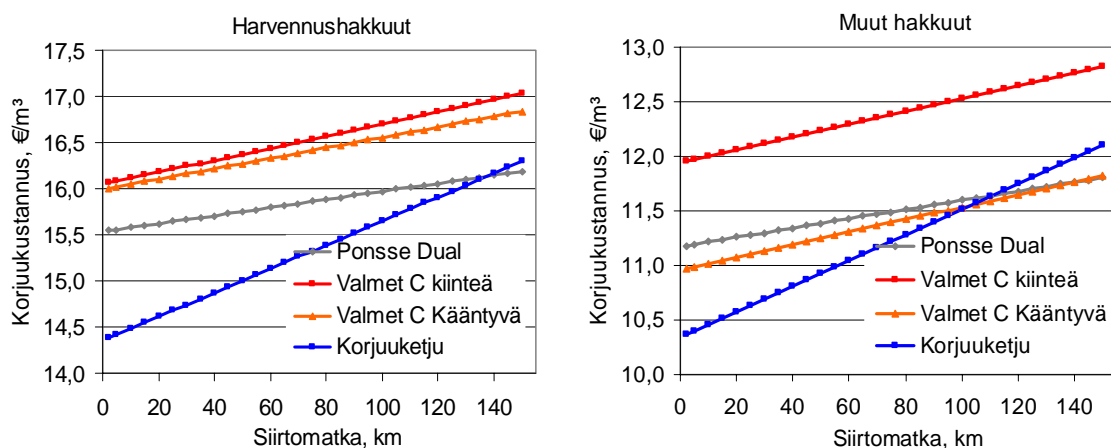
Kuva 24. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille korjuukohteen ajouravarsitiheyden funktiona Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 1 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Kymmenen kilometrin siirtomatkan lisäys kasvatti korjuuketjun korjuukustannusta keskimäärin 0,1 €kuutiometrille (vaihtelu 0,07–0,16 €/10km), kun taas korjureilla vastaava kasvu oli 0,05 € kuutiometrille (vaihtelu 0,03–0,06 €/10km) (kuvat 25 ja 26). Siirtomatkan vaihdellessa korjuukustannusmalleilla ei löydetty kustannusten leikkauspistettä korjuuketjun ja korjureiden välillä Saimaan korjuualueella, kun muut korjuukustannusmuuttujat olivat korjuun keskimääräisiä arvoja. Vastaavasti Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella Ponsse Dual oli 115 km:n siirtoetäisyyttä pidemmällä siirtymillä korjuuketjua edullisempi harvennuskohteilla. Muilla hakkuukohteilla vastaavasti kilpailukykyetu oli Ponsse Dualilla ja Valmet Combin kääntävällä kuormatilalla 95–100km pidemmällä siirtoetäisyyksillä.

Tarkastelu kohdistui korjuualueilla ns. normaaleihin siirtoetäisyyksiin. Lisäksi korjureilla kuvissa ilmenevät erot kustannuskäyrän jyrkkyydessä johtuvat simuloinnin aiheuttamasta satunnaisesta vaihtelusta korjuun ajanmenekkeihin.



Kuva 25. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille korjuukohteen siirtoetäisyyden funktiona Saimaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 2 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.



Kuva 26. Regressioanalyysillä laaditut korjuukustannukset eri korjuukonsepteille korjuukohteen siirtoetäisyyden funktiona Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Korjuuketjulle kustannuksiin lisätty 1 % odotuksista aiheutuvia keskeytyksiä. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

3.5 Kilpailukykyiset korjuukohteet korjureille

Perusleimikkoaineistosta tarkasteltiin korjureille kilpailukykyiset korjuukohteet, eli kohteet, joissa korjuren korjuukustannus oli korjuuketjun kustannuksia alhaisemmat. Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla kilpailukykyisten korjuukohteiden poistuma sekä lukumäärä olivat muita korjurikonsepteja suuremmat (taulukko 27). Keskimäärin 7 % korjuukohteiden kokonaispoistumasta oli edullisempaa korjata Combin kääntyvällä kuormatilalla kuin korjuuketjulla. Tarkasteltaessa korjuukohteiden lukumäärää kääntyvän kuormatilan konseptille edullisten kohteiden osuus oli jo 21–22,4%. Ponsse Dualilla vastaavat arvot olivat noin 4,5% ja 16–17,3 %.

Valmet Combi kiinteälle kuormatilalle harvennushakkuukohteet olivat taloudellisesti soveltuvimpia korjuukohteita (kokonaispoistumasta 34,2% ja 42,1% harvennuksilta). Ponsse Dual konseptilla harvennushakkuukohteita oli lukumäärällisesti eniten vaikkakin päätehakkuilta kertyi eniten puuta (kokonaispoistumasta 35,7% ja 48,5% päätehakkuilta). Vastaavasti kääntyvän kuormatilan Combi-konseptilla taloudellisesti soveltuvimmat kohteet painottuivat selvemmin päätehakkuille (kokonaispoistumasta 44,4% ja 52,9% päätehakkuilta).

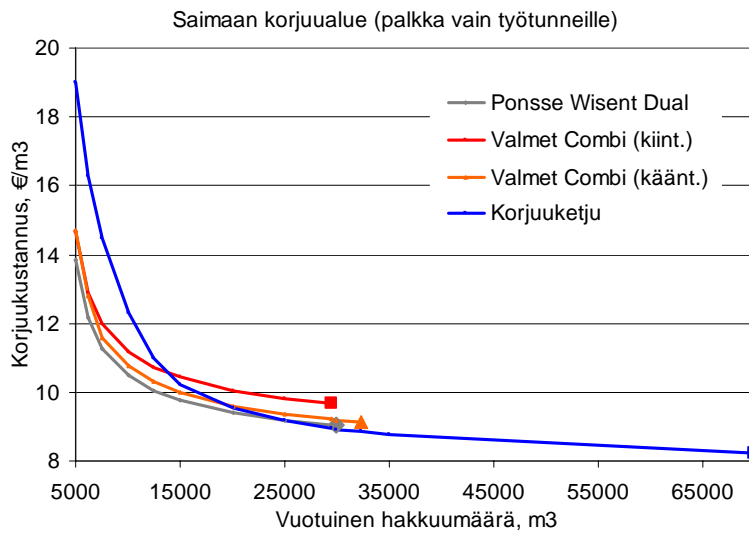
Taulukko 27. Korjureille kilpailukykyisten korjuukohteiden osuudet koko leimikkoaineistosta sekä kilpailukykyisten kohteiden hakkuutapojen osuudet (3 suurinta). Vertailukohteena korjuuketjun kustannukset. (S = Saimaan korjuualue, P-P = Pohjois-Pohjanmaan korjuualue)

Kilpailukykyiset hakkuukohteet	Ponsse Wisent Dual		Valmet Combi kiinteä kuormatila		Valmet Combi kääntyvä kuormatila	
	S	P-P	S	P-P	S	P-P
Hakkuukohteiden osuus poistumasta, %	4,2	4,6	1,9	2,8	7,5	6,9
korjuulohkoista, %	16,0	17,3	11,7	12,5	22,4	21,0
Hakkuutapojen osuudet poistumasta (3 suurinta)						
harvennushakkuut, %	34,0	34,0	42,1	34,2	12,8	15,4
päätehakkuut, %	35,7	48,5	21,1	36,5	44,4	52,9
ylispuiden poisto, % korjuulohkoista	11,4	7,5	22,5	15,5	15,0	13,2
harvennushakkuut, %	44,2	42,3	48,5	41,8	26,8	26,0
päätehakkuut, %	25,9	41,7	15,5	33,7	32,7	47,3
ylispuiden poisto, %	14,3	9,0	22,3	16,5	19,9	14,8

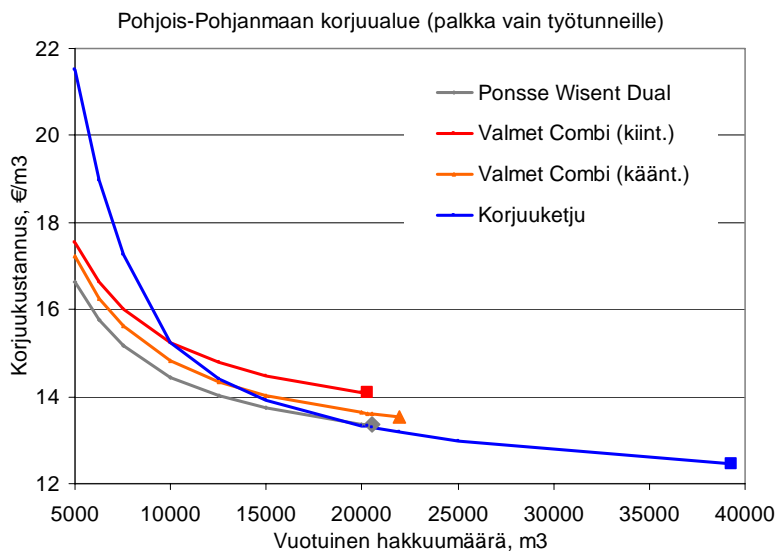
3.6 Hakkuusuoritteiden vaikutus korjuukustannuksiin

Vuotuisen hakkuumäärän vaikutusta korjuun yksikkökustannuksiin tarkasteltiin kaikille konekonseptille normaalin hakkuutaparakenteen perusleimikkopankeissa. Tarkasteluissa konekonseptien kustannuskäyrät loppuvat korjuumäärään, jossa kullakin korjuukonseptillä täyttyy 4 400 työtuntia, joka vastaa noin 23 kahden työvuoron työpäivää vuoden jokaisena kuukautena. Korjuuketjulla kustannuskäyrä vastaa hakkuukoneen kaksivuorotyökäyttöä. Lisäksi molempien korjuualueiden tarkasteluissa korjuuketjun kustannustasoon huomioitiin 1/3-osa kaikista koneiden maksimiodotusajoista (2 %:n kustannuslisä Saimaan korjuualueella ja 1 %:n kustannuslisä Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella).

Ensimmäisessä tarkastelussa koneenkuljettajille palkka maksettiin vain puunkorjuun työtunneista (ts. koneiden seisonta-ajalta ei makseta palkkaa) (kuvat 27 ja 28). Tarkastelun mukaan Saimaan korjuualueella Ponsse Dual konseptin kilpailukyky korjuuketjuun nähden ulottui noin 23 000 m³:iin, kun myös korjuuketjulla hakattiin sama määrä. Vastaavasti Valmet Combi konseptista kiinteällä kuormatilalla kilpailukykyinen hakkuumäärä korjuuketjuun nähden tuli vastaan jo noin 13 500 m³:ssä ja kääntyvällä kuormatilalla noin 18 000 m³:ssä. Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella korjureiden kilpailukykyinen kustannusraja tuli vastaan pienemmällä korjuumäärällä (kuva 28). Vuotuisen hakkuumäärän ollessa alle 19 000 m³ Ponsse Dual oli korjuuketjua edullisempi, kun taas Combi konseptilla kiinteän kuormatilan kilpailukykyetu ulottui 10 000 m³:iin asti ja kääntyvällä kuormatilalla 13 200 m³:iin asti.

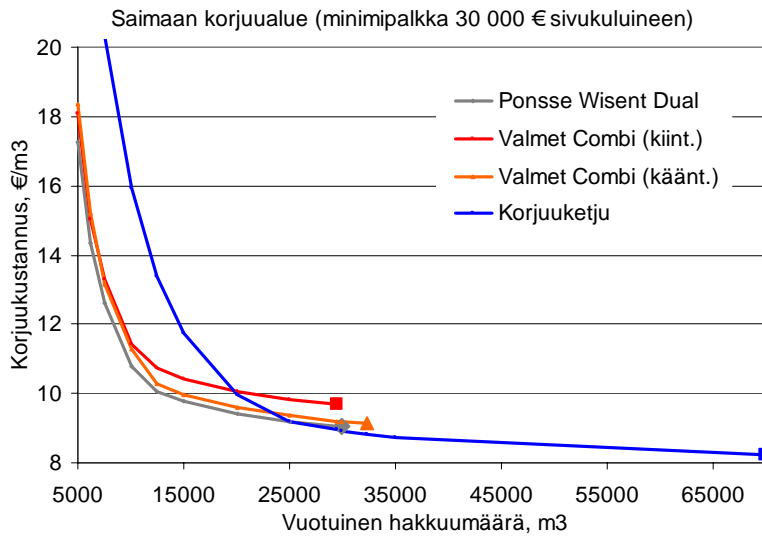


Kuva 27. Vuotuisen hakkuumäärän vaikutus konekonseptien korjuukustannuksiin Saimaan korjuualueella, kun koneiden seisonta-aikana kuljettajille ei makseta palkkaa. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

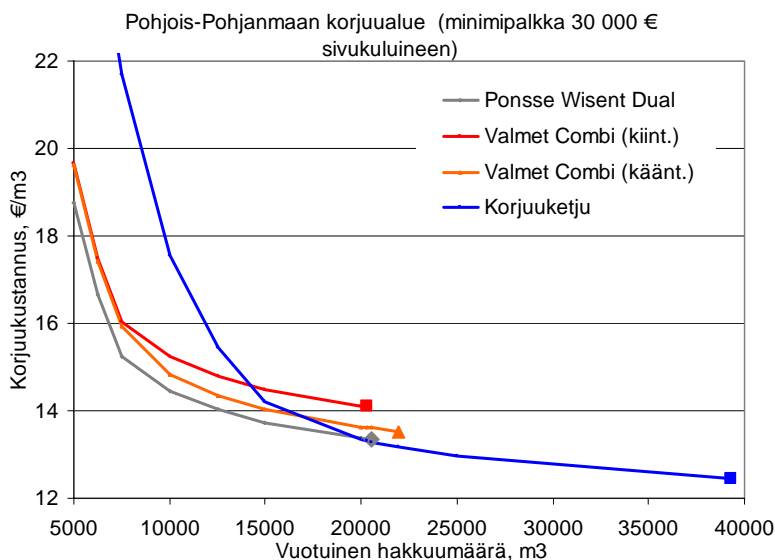


Kuva 28. Vuotuisen hakkuumäärän vaikutus konekonseptien korjuukustannuksiin Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella, kun koneiden seisonta-aikana kuljettajille ei makseta palkkaa. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

Toisessa tarkastelussa jokaisen koneen korjuukustannuksiin asetettiin minimipalkkaraja, joka oli 30 000 € vuodessa sisältäen palkan sivukulut (kuvat 29 ja 30). Jos koneenkuljettajalle maksetaan palkkaa myös koneen seisonta-ajalta, pienemmillä vuotuisilla hakkuumäärillä korjuukustannukset nousevat suuremmiksi edelliseen tarkasteluvaihtoehtoon verrattuna. Erityisesti korjuuketjulla hakkuumäärän muutoksella on selvästi suurempi vaikutus korjuukustannusten muutokseen korjureihin nähden.



Kuva 29. Vuotuisen hakkuumäärän vaikutus konekonseptien korjuukustannuksiin Saimaan korjuualueella, kun konekustannusten palkkakulujen minimiarvona on 30 000 € vuodessa. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.



Kuva 30. Vuotuisen hakkuumäärän vaikutus konekonseptien korjuukustannuksiin Saimaan korjuualueella, kun konekustannusten palkkakulujen minimiarvona on 30 000 € vuodessa. Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone.

3.7 Herkkyysanalyysit korjuukonsepteille

Herkkyyssanalyysissä oli mukana niitä korjuun työvaiheita ja kustannustekijöitä, joiden arvot erosivat merkittävimmin konekonseptien välillä (Taulukko 28). Toisaalta tarkasteltujen tekijöiden voidaan olettaa muutoksia konekonseptien välillä erityisesti kone- ja työtekniikoiden kehityksessä. Taulukossa 28 tekijöiden muutokset on esitetty 10 %:n muutoksina alkuperäisistä arvoista ja muutosten vaikutukset alkuperäisiin korjuun yksikkökustannuksiin on esitetty suhteellisenä. Näin ollen esimerkiksi Valmet 801 Combilla kuormauksen- ja purun tuottavuuden lisääntyessä 10 %:lla, muutoksen vaikutus korjuukustannukseen olisi 3,1–3,8 %:n vähennys kiinteälle

kuormatilalle ja 2,1–2,9 % kääntyvälle kuormatilalle. Saimaan korjuualueella korjuukustannusta vähentävä vaikutus on noin 0,8 prosenttiyksikköä suurempi kuin Pohjois-Pohjanmaalla.

Taulukko 28. Muutamien työvaihekestojen sekä hankintahintojen muutosten vaikutukset korjuun yksikkökustannuksen muutokseen tutkimuksen konekonsepteilla. Muutokset esitetty prosentteina.

	Korjuuketju ¹		Ponsse Dual		Valmet Combi kiinteä ktl.		Valmet Combi kääntyvä ktl. (VE1)	
	Saimaa	P-Pohj	Saimaa	P-Pohj	Saimaa	P-Pohj	Saimaa	P-Pohj
10 %:n muutokset, %:								
Hakkuun ajanmenekkiin, -10%	-4,8	-5,7	-4,2	-5,1	-4,0	-4,9	-4,7	-5,9
Kuormattuna- ja tyhjänäajan ajanmenekkiin, -10%	-1,1	-0,8	-1,3	-0,9	-1,3	-0,9	-1,4	-1,1
Kuormauksen ja purun ajanmenekkiin, -10%	-2,7	-2,2	-2,9	-2,4	-3,8	-3,1	-2,9	-2,1
Hankintahintaan, -10%	-2,8	-2,8	-3,6	-3,5	-3,9	-3,7	-4,0	-4,0

¹Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

Taulukossa 29 on havainnollistettu muutosvaikutus korjuukustannukseen, kun hankintahinta, hakkuun ajanmenekki sekä kuormauksen- ja purun ajanmenekki muuttuvat alkuperäisistä arvoista -5%– -10 %.

Taulukko 29. Hankintahinnan (-5%) sekä hakkuun että kuormauksen- ja purun ajanmenekkien (-10%) muutosten vaikutus konekonseptien alkuperäisiin korjuukustannuksiin.

	Korjuuketju ¹		Ponsse Dual		Valmet Combi kiinteä ktl.		Valmet Combi kääntyvä ktl. (VE1)	
	Saimaa	P-Pohj	Saimaa	P-Pohj	Saimaa	P-Pohj	Saimaa	P-Pohj
Korjuukustannus², €/m³	8,49	12,72	9,41	13,88	10,09	15,10	9,52	14,09
Muutokset, €/m³:								
Hankintahinta -5%			-0,17	-0,25	-0,19	-0,28	-0,19	-0,28
Hakkuun ajanmenekki, -10%			-0,39	-0,70	-0,39	-0,71	-0,44	-0,78
Kuormauksen ja purun ajanmenekki, -10%			-	-	-0,37	-0,44	-0,27	-0,31
Korjuukustannus lopuksi, €/m³			8,86	12,93	9,13	13,24	8,61	12,71

¹Korjuuketjussa hakkuukoneena kevyt yleiskone ja kuormatraktorina yleiskone

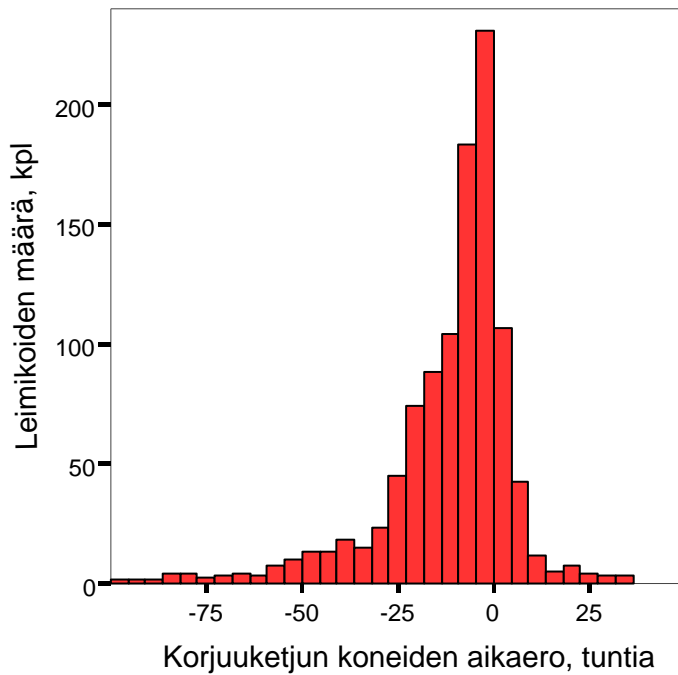
²Lähtötaso

3.8 Epätasapainoleimikot tuottavuuden suhteen

Korjuuketjun yleinen korjuun tasapainotilanne on esitetty kuvissa 31 ja 32 siten, että histogrammi näyttää sellaisten leimikoiden lukumäärän, joilla ilmenee kyseinen ajanmenekkiero hakkuukoneen sekä kuormatraktorin käyttötunneissa. Jos kuormatraktorin laskennallinen käyttötuntiaika leimikolla on vastaavaa hakkuukoneen arvoa suurempi, aikaero esitetään negatiivisena. Toisaalta histogrammin positiivisella puolella ovat leimikot, joissa hakkuutyö laskennallisesti kestää kauemmin kuin metsäkuljetus. Korjureiden voidaan olettaa tasapainottavan ensisijaisesti kohteita joissa tarvitaan työlisäystä hakkuuseen, sillä pelkästään metsäkuljetuksessa korjureiden kustannukset ovat liian suuret.

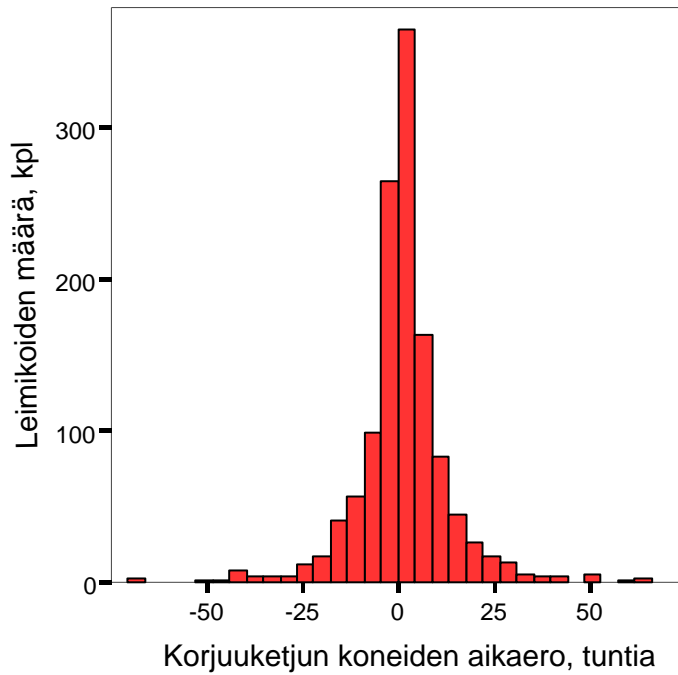
Jos kohteet rajataan leimikoihin, joissa hakkuukoneen ajanmenekkiero kuormatraktoriin nähden oli 14 käyttötuntia suurempi, tällaisia leimikoita oli Saimaalla 2,1 % perusleimikkosuman leimikoista. Pohjois-Pohjanmaan perusleimikkoaineistosta vastaavanlaisia leimikoita oli 9,4 %. Tämä koneiden välinen työaikaero käyttötunteina olisi tasapainotettavissa korjurilla sen toimi-

essa pääosin hakkuutehtävissä. Toisaalta epätasapainoleimikoita, joissa hakkuukoneen ajanmenekkiero kuormatraktoriin nähden oli 14 käyttötuntia pienempi, oli Saimaan korjuualueella peräti 31,8 %, kun taas Pohjois-Pohjanmaalla kohteita oli vain 7,0 %. Näillä kohteilla korjuuketjun tasapainotus olisi järkevämpää toteuttaa korjurin sijaan kuormatraktorilla. Tarkastelussa käytetty 14 tunnin käyttötuntiero vastaa puunkorjuuta korjurilla keskimäärin kahden työvuoron edestä.



Kuva 31. Korjuuketjun koneiden (hakkuukone ja kuormatraktori) välinen ajanmenekkiero käyttötunteina Saimaan perusleimikkosuman leimikoilla korjuutyön ajanmenekkimalleilla laskettuna. Aikaero saadaan vähentämällä hakkuukoneen käyttötunneista kuormatraktorin käyttötunnit.

Kuvat 31 ja 32 osoittavat siis korjuun yleisen tasapainotilanteen korjuuketjun osalta kullakin korjuualueella. Koko perusleimikkoaineiston perusteella Pohjois-Pohjanmaalla korjuu on melkein tasapainossa (keskiarvo 1,7 h, hakkuuta enemmän), kun taas Saimaan alueella metsäkulkutukseen kuluu leimikolla keskimäärin 12,3 käyttötuntia enemmän aikaa.



Kuva 32. Korjuuketjun koneiden (hakkuukone ja kuormatraktori) välinen ajanmenekkiero käyttötunteina Pohjois-Pohjanmaan perusleimikkosuman leimikoilla korjuutyön ajanmenekkimalleilla laskettuna. Aikaero saadaan vähentämällä hakkuukoneen käyttötunneista kuormatraktorin käyttötunnit.

4 Tarkastelu

4.1 Aineiston ja menetelmien tarkastelu

4.1.1 Leimikko- ja korjuulohkoaineisto

Simulointien leimikko- ja korjuulohkoaineiston koko oli riittävän suuri tarjoamaan luotettavan tarkastelun ja vertailtavuuden eri korjuumenetelmien välille. Kunkin korjuualueen perusleimikkopankit sisälsivät 2000 korjuulohkoa hakkuukertymän ollessa Saimaalla 553 812 m³ ja Pohjois-Pohjanmaalla 500 636 m³. Stora Enso Metsän leimikkoaineiston korjuulohkotason yksityiskohtainen korjuutieto antoi mahdollisuuden tarkkaan korjuulohkotasoiseen simulointiin, jossa hakkuutavat ja niissä erilaiset korjuun ajanmenekit voitiin ottaa huomioon.

Eri korjuualueiden leimikkoaineistojen hakkuurakenteesta voi kuvastua hakkuuajankohdan ero, sillä Saimaan korjuualueen leimikot oli hakattu 2003 ja Pohjois-Pohjanmaan leimikot 2005. Vuonna 2006 tullut metsäverotuksen muutos on voinut vaikuttaa Pohjois-Pohjanmaan leimikkoaineiston hakkuurakenteeseen pitkän ajan keskiarvosta hieman poiketen. Toisaalta molemmissa tapauksissa aineisto oli metsäverotusmuotojen yhtenäistämistä edeltävältä ajalta ja näin ollen on todennäköistä, että hakkuutaparakenne kokonaisuudessaan on nyt muuttunut ja tulee edelleen muuttumaan hieman vuoden 2006 alusta lähtien.

Leimikkoaineisto tarjosi mahdollisuuden vertailla korjuuolosuhteiltaan selvästi toisistaan poikkeavia korjuualueita (Saimaan ja Pohjois-Pohjanmaan korjuualueet). Saimaan leimikkoaineistoa ja sen korjuuolosuhteita voidaan kohtalaisella luotettavuudella yleistää Etelä-Suomen keskimääriisiin olosuhteisiin, kun taas Pohjois-Pohjanmaan leimikkoaineistoa voidaan yleistää Oulun, Kainuun sekä aivan eteläisimmän Lapin alueille. Merkittävimmät erot näiden korjuualueiden korjuutiedoissa ilmenivät keskirunkokoossa sekä leimikoiden välisissä etäisyyksissä (ks. Sivu 11 taulukko 4). Lisäksi aineisto sisälsi kaikki ko. alueilla yhden urakanantajan korjuussa olleet leimikot. Koneyrittäjän päätöksenteon ja toimintamahdollisuuksien kannalta tilanne oli hyvin relevantti.

4.1.2 Simulointimalli

Tutkimuksessa käytetty diskreetti simulointi on menetelmänä tehokkaimmillaan monimutkaisten prosessien mallittamisessa. WITNESS-simulaattorin käytöstä puunkorjuun tai metsäisten materiaalinhallinnan ja -logistiikan ongelmien tutkimisessa on kertynyt laajalti kokemusta aiemmissa metsäteknologisissa tutkimuksissa (mm. Asikainen 1995, Asikainen 1998, Asikainen ja Nuuja 1999, Väättäinen ym. 2000, Asikainen 2001, Väättäinen ym. 2005b). Tässä tutkimuksessa korjuuprosessin eri vaiheiden ja tekijöiden vuorovaikutukset sekä konetyön keskeytysten ja toiminnan vaihteluiden huomioon ottaminen sopivat hyvin diskreetin simuloinnin hyödyntämiselle. Simulointimallien toiminnan oikeellisuutta ja luotettavuutta myös tarkastettiin korjurihankkeessa laaditun puunkorjuun analyysimallin avulla.

Korjuukonseptien simulointimallit laadittiin vastaamaan mahdollisimman hyvin käytännön puunkorjuun työvaiheita ja korjuutyön etenemistä. Simulointi sisältää yksinkertaistuksia ja simulointiajojen läpivientiä helpottavia ratkaisuja, niin myös tässä tutkimuksessa. Simulointimallien korjuutyön jatkuvatoimisuus erotti mallin simulaatiotoiminnot käytännön korjuutoiminnosta. Simulointimalleissa konetyön keskeytysjakaumat sisälsivät myös työvuorovaihdot, joten

simulointiin ei asetettu erillistä, säännöllisin väliajoin tapahtuvaa työvuoron vaihto-elementtiä. Vasta korjuun yksikkökustannuksia laskettaessa kustannuslaskentamenetelmä otti huomioon työmaakalenterin vaikutukset siihen kuuluvine työ- ja vapaa-aikoiineen.

Korjuun simulointi antoi aiempiin tutkimuksiin verrattuna (esim. Kärhä ym. 2007a) hieman korkeampia käyttöasteita (noin 1–2 prosenttiyksikköä), mikä johtui pääosin tässä tutkimuksessa käytetyistä keskeytysjakaumista sekä koneisiin kuuluneesta muusta järjestelyajasta. Kone-siirtojen järjestelyaika oli tutkimuksessa asetettu joka koneelle vain 30 minuutiksi. Todellisuudessa siirtojen aputoiminnot kestävät kauemmin sisältäen muutakin kuin koneen kuljetustasolle ajoa ja poistoa koneenkuljetusautosta (Kärhä ym. 2007a).

Leimikoiden hakkuujärjestys simuloinneissa vastasi aineistoon tallentunutta korjuujärjestystä, jolloin leimikoiden ketjutus vastasi toteutunutta korjuuta. Korjuuketjun koneilla korjuutyön tuottavuuserot saivat aikaan tilanteita, joissa hakkuukone saattoi kuormatraktoria suuremmalla tuottavuudella edetä korjuussa useammankin korjuulohkon verran kuormatraktorin edelle. Koska simuloinnissa ei ollut erikseen asetettu korjuuketjun koneiden työajan järjestämisestä korjuutyön etenemisen tasapainottamiseksi, simulointiin määritettiin asete, jossa hakkuukone ei voinut edetä kahta korjuulohkoa kuormatraktoria pidemmälle. Epätasapainotilanteissa tämä ylimääräinen aika tallentui erillisenä hakkuukoneen odotusaikana. Toisaalta kuormatraktorille tallentui vastaavaa korjuutyön epätasapainosta johtuvaa odotusaikaa, jos hakkuun etenemistä tuli odottaa. Käytännössä tehokkaalla työaika- ja korjuukalustonohjausjärjestelyillä voidaan päästä lähelle tätä simuloinnin optimitilannetta, jossa epätasapainotilanteen taukoaikaa ei otettu laskelmiin huomioon. Simulointimallin konekonseptien korjuukustannuksia tarkasteltaessa ja verrattaessa niitä keskenään tämä seikka korjuuketjun osalta tulee ottaa huomioon.

Korjureita verrattiin Suomessa käytetyimpiin korjuuketjun konekoluokkiin (hakkuukoneissa kevyet yleiskoneet ja yleiskoneet sekä kuormatraktoreissa yleiskoneet ja päätehakkuukoneet). Myös ajanmenekkimallien pohjana olleet aikatutkimukset ovat perustuneet lähes yksinomaan yleiskoneluokkiin (esim. Kuitto ym. 1994, Väkevä ym. 2001, Nurminen ym. 2006). Tällä hetkellä esimerkiksi keskikokoisten, massaltaan 14–18 tonnin kuormatraktoreiden osuus myynnistä on kaksi kolmasosaa (Metsä Trans 2006), joten ensisijainen vertailu näihin kokoluokkiin oli perusteltua.

Simulointimalleilla ei tarkasteltu erikseen korjuun työtekniikoita eri konsepteilla, vaan kullekin konseptille tutkimukseen valittiin yleisimmät käytössä olleet korjuun työskentelytekniikat ja niihin perustuneet ajanmenekkimallit. Korjureista Valmet Combin kääntyvälle kuormatilalle toteutettiin kaksi kuormaustavaltaan erilaista simulointivaihtoehtoa, sillä erityisesti suorakuormauksen osuus erilaisilla hakkuutapakohteilla perustuu vielä osin asiantuntija-arvioihin ja osin muutamiin tutkimuksiin. Vertailuissa pääosin mukana ollut kääntyvän kuormatilaraisen korjurin vaihtoehto (VE1) muodostuu maltillisesta arviosta käsiteltävän puun suorakuormaus osuudesta. Sen sijaan toinen vaihtoehtoista on lupauksellisempi, ja tuo esille suorakuormausosuuden lisäyksen vaikutuksen korjuukustannukseen. Erityisesti suorakuormauksen, mutta myös kääntyvän kuormatilaratkaisun ja sen käytettävyyden osalta kääntyvän kuormatilan korjurin tuloksiin tulee suhtautua muita konekonsepteja suuremmalla varauksella.

Käytännön puunkorjuusta hieman poiketen puutavaralajien lähikuljetus tapahtui simulointimallissa aina sekakuormina kohteen puutavaralajimäärästä riippumatta. Käytännön puunkorjuussa ajo sekakuormina on yleistä, mutta tilanteissa, joissa kohteella puutavaralajimäärät ja/tai niiden hakkuukertymät ovat suuria, on usein järkevämpää lähikuljettaa enemmistö- ja vähemmistöpuutavaralajit erikseen omina kuorminaan. Simuloinnissa otettiin huomioon kuitenkin puutavarala-

jin lisäys metsäkuljetuksessa maltillisena kuormauksen ja purun ajanmenekin kasvuna, jossa yhden puutavaralajin lisäys kasvatti kuutiometrikohtaista ajanmenekkiä 0,1 minuuttia. Muista poiketen yhdistelmäkouran vaikutus oli Valmet Combi -korjureilla 0,12 minuuttia/kuutiometri yhtä puutavaralajin lisäystä kohden. Tutkimuksissa on havaittu Valmet Combi -korjureilla puutavaralajimäärän kasvun voimakas vaikutus ajanmenekkiin (Ljundahl 2004, Nuutinen ym. 2006). Simulointitutkimuksessa korjuulohkon puutavaralajimäärät vaihtelivat 3:sta 10:een. Toisaalta tällaisessa puunkorjuun simulointiympäristössä on jatkossa myös mahdollisuus tutkia sopivinta kuormakohtaista puutavaralajimäärää kustannustehokkaassa metsäkuljetuksessa.

Leimikoiden ja korjuulohkojen välinen siirtomatka laskettiin kertomalla suora linnuntie-etäisyys mutkittelukertoimella 1,6 molempien korjuualueiden hakkuukohteilla. Todellisuudessa hakkuukohteiden välinen etäisyys voi tapausittain vaihdella merkittävästi linnuntie-etäisyyden suhteen, jolloin erityisesti vesistöalueet, ja siten tieverkoston rakenne voivat muuttaa suuresti siirtomatkaa. Näin ollen Saimaan korjuualueella simuloinneissa käytetty mutkittelukerroin olisi voinut olla Pohjois-Pohjanmaan arvoa suurempi. Leimikoiden välinen keskimääräinen siirtomatka Saimaan korjuualueen perusleimikoissa oli 18,3 km ja Pohjois-Pohjanmaalla vastaavasti 30,5 km. Arvot ovat lähellä todellisia siirtomatkoja. Esimerkiksi Metsätehon laskelmissa leimikoiden välisenä siirtomatkana käytetään yleisesti 30 kilometriä (Kärhä ym. 2007a). Kuiton ym. (1994) tutkimuksessa hakkuukoneiden siirtomatka oli keskimäärin 28,0 km ja kuormatraktoreilla vastaavasti 22,5 km.

Simulointimalleissa korjuuketjun koneiden ajanmenekkimallit ovat peräisin tutkimuksista, joissa ajanmenekkiaineisto on ollut laaja. Toisaalta korjureiden osalta useat aikaturkimukset ovat olleet lyhyitä ja erityisolosuhteissa toteutettuja. Siksi korjureiden ajanmenekkimallit perustuvat hakkuukoneen ja kuormatraktorin mallipohjiin, joita muotoiltiin korjurikonsepteille paremmin sopiviksi. Korjureiden ajanmenekkimallien laadinnassa käytettiin hyödyksi kaikki tutkimustietous sekä kerätty haastattelutietous. Lisäksi niiden korjurityövaiheiden osalta, jotka erosivat merkittävimmin korjuuketjun työvaiheista ja joissa oli ajankäytön suhteen epävarmuutta, toteutettiin herkkyysanalyysitarkastelu mahdollisten aikamuutosten vaikutuksesta korjuukustannuksiin.

4.1.3 Kustannuslaskenta

Konekonseptien hankintahinnat olivat laitevalmistajien ilmoittamia yleisiä listahintoja keväältä 2006. Todelliset hankintahinnat ovat noin 5–10 % listahintoja pienemmät vaihdellen tapauskohtaisesti. Toisaalta eri metsäkonevalmistajilla vastaavien kokoluokkien ja varustelutasojen konemallien listahinnat erosivat toisistaan, minkä vuoksi hakkuukoneiden sekä kuormatraktoreiden osalta käytettiin kolmen konevalmistajan keskiarvohintoja. Kustannusvertailun perustuesssa yleiseen määritettyyn perushintatasoon oli konekonseptien vertailu luotettavaa.

Herkkyysanalyysissä tarkasteltiin koneiden hankintahinnan muutoksen vaikutusta korjuukustannuksiin. Muutoin konekustannuslaskennan kustannustaso perustui vuoden 2006 kevään hintatasoon. Lisäksi kustannuslaskennassa koneiden käyttö- ja kulutustekijöissä pyrittiin huomioimaan konekonseptien eroja. Hakkuulaitteen tai yhdistelmäkourien (Valmet Combi) osalta käytettiin samaa hankintahintatasoa, vaikka samaa kokoluokkaa olevien hakkuulaitteiden hinnat eri laitevalmistajilla voivat erota suurestikin. Yleisesti ottaen kustannuslaskennan arvot vastasivat melko hyvin Kärhän ym. (2007a) korjuritutkimuksen vastaavia arvoja.

Kustannuslaskennassa metsäkoneiden siirtokustannukseksi asetettiin 1,5 € siirtokilometrille. Näin ollen koneen siirto leimikolta toiselle maksoi Saimaalla keskimäärin 117,5 € (siirrot varikolta leimikolle ja takaisin 60 km + leimikkosiirtymä 18,3 km) ja Pohjois-Pohjanmaalla 135,8 € Väättäisen ym. (2006a) laskelmassa ajomatkan ollessa 105,5 km/siirto (sisälsi myös muut siirrot; +10 %) ja siirtokustannuksen ollessa 1,62 €/km, yhden koneen siirtokustannus leimikolle oli 171 € Vastaavasti Kärhän ym. (2007a) tutkimuksessa korjureiden siirtokustannus oli keskimäärin 203 € ja korjuuketjun siirtokustannus vastaavasti 469 €. Simulointitutkimuksen selvästi matalammat siirtokustannukset vaikuttavat suoraan korjuukonseptien vertailtavuuteen korjureiden ja koneketjun välillä. Jos todelliset siirtokustannukset konetta kohden ovat simulointitutkimuksen esitettyjä arvoja suuremmat, korjureiden kilpailukyky korjuuketjuun nähden kasvaa, erityisesti kertymältään pienillä leimikoilla. Tämä tärkeä korjuukonsepteja erottava tekijä tulee ottaa huomioon vertailtaessa konsepteja keskenään. Tämän vuoksi tutkimuksen tulokset sopivat paremmin tilanteeseen, jossa korjuuyrittäjällä on useampia korjuukoneita, keskimääräistä enemmän siirtoja ja sen vuoksi hyvän siirtokaluston käyttöasteen takia kustannus siirtokilometrille jää 1,5 euroon tai jopa allekin.

Kaikille korjurikonsepteille korjaus- ja huoltokustannukset oli asetettu samalle tasolle kustannusten perustuessa Kärhän ym. (2007a) korjuritutkimuksessa esitettyihin arvoihin. Konekonseptien korjaus- ja huoltokustannukset olivat korjureille 9,69 € hakkuukoneelle 10,63 € ja kuorma-tractorille 7,81 € käyttötuntia kohden. Käytännössä voidaan kuitenkin olettaa, että Valmet Combin korjaus- ja huollon kustannukset olisivat Ponsse Dual korjurin kustannuksia suuremmat. Myös korjuriyrittäjien viimeisimmät haastattelut tukivat tätä olettaa (Yrittäjähaastattelu 2007). Erityisesti kääntyväkuormatilaisessa korjurissa kuormatilan tekniset ratkaisut tuovat uuden huollon ja korjauskohteen. Tutkimuksen konekonseptien kustannuslaskelmien perusteella korjuu- ja huoltokustannusten kasvu 10 %:lla lisää korjuun yksikkökustannuksia keskimäärin 1 %:lla. Korjureiden teknologinen kehitys parantaa edelleen niiden teknistä luotettavuutta, sillä useat tekniset ratkaisut korjureissa ovat vielä suhteellisen uusia.

Puunkorjuun yksikkökustannukset esitettiin absoluuttisina arvoina. On erityisen tärkeää pitää mielessä se, että kunkin konekonseptin kustannusarvot perustuvat annettuihin lähtöarvoihin ja simuloinneissa käytettyihin malleihin. Esimerkiksi vuotuisen käyttötuntimäärän lisääntyessä muutokset eri konekonseptien yksikkökustannuksiin ovat hieman erilaiset. Tätä tosin voidaan tarkastella tutkimuksen vuotuisen hakkuusuoritteen vaikutusten yhteydessä sivuilla 44–46. Yksikkökustannusten yleistämisessä käytännön tilanteisiin on siis otettava huomioon tutkimuksessa käytetyt lähtöarvot ja tutkimuksen erityispiirteet, sekä niiden eroavuudet käytännön tilanteesta. Tärkeimpänä perusteluna absoluuttisten korjuukustannusarvojen esittämisessä oli konekonseptien luotettava, selkeä ja läpinäkyvä vertailtavuus sekä simulointimenetelmän ja konekustannuslaskennan kokonaistoimivuuden osoittaminen erilaisten korjuuolosuhteiden vallitessa.

4.1.4 Regressiomallinnus

Regressioanalyysillä saatiin esille korjuukustannukseen merkittävästi vaikuttavat leimikko-muuttujat sekä niiden merkitystasot, kun perusleimikkopankkien korjuulohkojen taustatiedot sekä konseptien korjuulohkokohtaiset korjuukustannukset olivat analyysin lähtöaineistona. Korjuukustannusten regressiomallinnuksen avulla voitiin tarkastelua tehdä kunkin malliin valitun muuttujan suhteen. Tämä avasi mahdollisuuden konekonseptien väliseen vertailuun erilaisissa korjuuolosuhteissa. Kuten tässä tutkimuksessa, niin myös tulevissa simulointitutkimuksissa tällainen toimintatapa tarjoaa laajojen simulointitulosaaineistojen tehokkaampaa tulkintaa sekä tar-

kempia havaintoja erilaisten tutkittavien menetelmien sekä koneiden ja laitteiden välisistä eroista.

4.2 Tulosten tarkastelu

Simulointimallin erot käyttötuntituottavuudessa Valmet Combin kiinteän kuormatilan ja Ponsse Dual Wisentin välillä olivat hyvin pieniä. Tosin päätehakkuukohteilla malli antoi Dual-korjureille noin 5 % Combin kiinteän kuormatilan konseptia korkeamman tuottavuuden. Sekä rungon koon että kohteen hehtaarikohtaisen kertymän kasvu vaikuttivat Dualin eduksi. Valmet Combin vastaavan tasoinen etu tuottavuuden suhteen tuli esille kohteissa, joissa hakkuukertymä oli alle 200 m³. Näillä kohteilla vastaavasti pieni hehtaarikohtainen kertymä sekä Dualin korjuutavan vaihdot olivat Combille eduksi.

Valmet Combin kääntyvän kuormatilan käyttötuntituottavuudet olivat samaa tasoa harvennuskohteilla muiden korjurikonseptien kanssa, mutta päätehakkuilla ja normaalin hakkuutaparakenteen leimikoilla kääntyvän kuormatilan tuottavuus oli vastaavasti noin 15 % ja 10 % muita korjurikonsepteja suurempi. Hakkuukertymältään pieniä leimikoita lukuun ottamatta kääntyvän kuormatilan korjurilla tuottavuudet olivat vain hieman korjuuketjua suuremmat Saimaalla, mutta Pohjois-Pohjanmaalla erot olivat selvemmät kääntyvän kuormatilan eduksi.

Kärhän ym. (2007a) korjureiden seurantalutkimuksen mukaan korjureiden käyttötuntituottavuus oli ensiharvennuksella keskimäärin 5,7 m³/h, muulla harvennuksella 6,3 m³/h ja päätehakkuulla 7,7 m³/h, eikä merkittäviä tuottavuuseroja korjurikonseptien välillä ollut. Kärhän ym. (2007a) tutkimuksesta poiketen simuloinneissa käytettyjen ajanmenekkimallien toiminnan vuoksi Ponsse Dualin ja Valmet Combin välille ei tullut merkitsevää eroa rungon koon muuttuessa. Kärhän ym. (2007a) tutkimuksen mukaan Valmet Combi oli 0,8 m³/h Ponsse Dualia tuottavampi ensiharvennuksella, kun taas muilla harvennuksilla Ponsse Dualin tuottavuus oli 0,8 m³/h Valmet Combia korkeampi. Esimerkiksi tässä simulointitutkimuksessa Saimaan korjuualueella korjureiden käyttötuntituottavuuksien (Ponsse Dual ja Valmet Combi kiinteällä kuormatilalla) keskiarvot olivat ensiharvennuksella 4,5 m³/h, kaikilla harvennuskohteilla 5,1 m³/h ja päätehakkuulla 9,9 m³/h. Hakkuutapojen runkokoolla oli suurin vaikutus tuottavuuteen ja tutkimusten välillä ilmenneisiin eroihin.

Sekä korjureiden että korjuuketjun koneiden toiminnalliset käyttöasteet olivat hieman Kärhän ym. (2007a) korjuritutkimuksen vastaavia arvoja korkeammat. Kärhän ym. (2007a) tutkimuksessa korjureiden käyttöaste oli keskimäärin 83 %, hakkuukoneen käyttöaste 80 % ja kuormatraktorin 85 %. Vastaavasti simulointitutkimuksessa normaalin hakkuutaparakenteen vallitessa korjuualueiden keskiarvo oli korjurille 86 %, hakkuukoneelle 83 % ja kuormatraktorille 88 %. Huomionarvoista on se, että esitetyt käyttöasteet korjuuketjun koneille olivat tilanteesta, jossa korjuuketjun epätasapainosta johtuvaa koneiden odotusaikaa ei ole otettu huomioon. Näin ollen käyttöasteet olisivat todellisuudessa esitettyjä arvoja hieman pienemmät. Käyttöasteet vaihtelivat luonnollisesti hieman korjurikonseptittain, korjuualueittain ja hakkuutavoittain. Vaikka molemmilla korjurikonseptilla olivat samat keskeytysjakaumat käytössä, Ponsse Dual -konseptilla oli hieman pienempi käyttöaste kuin Valmet Combilla, tämän johtuessa siitä, että korjuutavan vaihto ei kuulunut käyttöaikaan (20 min keskeytys). Uusimmissa seurantalutkimuksissa kuormatraktoreilla toiminnallinen käyttöaste oli 88,2 % (Väkevä ym. 2001) ja harvennushakkuukoneilla tekninen käyttöaste 84,5 % (Sirén ja Aaltio 2003). Korjureiden käyttöasteet näyttäisivät yleisesti ottaen asettuvan hakkuukoneiden ja kuormatraktoreiden käyttöasteiden välille (Jylhä 2006a, Kärhä ym. 2007a).

Kärhän ym. (2007a) tutkimuksen kustannuslaskennassa korjareiden tuntikustannukset olivat 75 ja 83 € Vertailussa korjuuketjuun tuntikustannus harvennushakkuukoneella oli 79 € ja keskiraskaalla kuormatraktorilla 57 € Kärhän ym. (2007a) tutkimuksessa kaikille koneille vuotuinen käyttötuntimäärä oli 2 574 tuntia. Tässä simulointitutkimuksessa Ponsse Wisent Dual -korjurin korjuualueiden keskiarvoinen tuntikustannus oli 75 € sekä Valmet Combi kiinteän kuormatilan korjurin 78 €(kääntyvällä kuormatilalla 81 €). Korjuuketjulla tuntikustannukset olivat 82 € keskiraskaalle yleishakkuukoneelle ja 57 € keskiraskaalle kuormatraktorille. Korjuuketjun koneiden tuntikustannukset kasvavat, jos korjuuketjun tuottavuusepätasapainosta tulevat odotukset otetaan mukaan. Vaikka korjareiden hankintahinnat ja siten pääoman poistot ovat hakkuukoneiden vastaavia arvoja korkeammat, korjareiden tuntikustannuksia kompensoivat hakkuukonetta pienemmät käyttökustannukset. Esimerkiksi Valmet-korjareiden hakkuukonetta alhaisemmat tuntikustannukset selittyvät pääosin pienemmällä siirtokustannuksilla sekä hakkuulaitteen/yhdistelmäkouran käyttö- ja pääomanpoistokustannuksilla. Kustannustekijöiden erot ovat nähtävissä yksityiskohtaisemmin sivujen 25–26 taulukoista 16 ja 17.

Saimaan korjuualueen perusleimikkopankin simuloinneissa korjuuketjun korjuukustannusten voidaan todeta olevan lähellä keskimääräistä valtakunnallista kustannustasoa vuodelta 2005, jolloin koneellisen puunkorjuun keskimääräinen korjuukustannus oli 8,53 €/m³ (Kariniemi 2006). Tutkimuksen korjuuketjuvaihtoehdoissa Saimaan korjuualueen perusleimikkopankin korjuukustannukset olivat vain hieman Metsätehon esittämää keskimääräistä kustannusta suuremmat (kevyt yleiskoneluokka 8,51–9,10 €/m³), kun taas Pohjois-Pohjanmaalla vastaavat kustannukset olivat noin 4 € suuremmat. Suurempaa kustannustasoa selittivät vuoden 2006 korkeampi hintataso kustannustekijöissä sekä erityisesti Pohjois-Pohjanmaan muuta maata pienempi hakkuiden rungonkoko.

Harvennuskohteilla rungon koon vaikutus korjareiden korjuukustannuksiin oli samankaltainen tässä tutkimuksessa ja Kärhän ym. (2007a) korjuritutkimuksessa. Sitä vastoin korjuuketjulla korjuukustannus pienellä rungonkoolla (alle 100 dm³) oli Kärhän ym. (2007a) tutkimuksessa korjareiden kustannuksia suurempi. Simulointitutkimuksessa vastaavasti korjuuketjun korjuukustannukset olivat aina korjareita pienemmät rungon eri kokoluokissa, kun muut leimikko-olosuhteet olivat keskimääräisiä. Myös muissa korjuritutkimuksissa korjareiden ja korjuuketjun kustannuksia vertailtaessa korjurit ovat olleet keskimäärin noin 5 % korjuuketjua kalliimpia korjuukustannuksiltaan (Jylhä ym. 2006a). Päätehakkuukohteilla Valmet Combin kääntyvällä kuormatilalla sekä Ponsse Buffalo Dual -konseptilla on korjuritutkimuksissa päästy koneketjun korjuukustannustasolle ja jopa hieman allekin (Andersson 2002, Hallonborg ym. 2005).

Korjurikonseptien kustannusero normaalin hakkuutaparakenteen leimikkopankin keskimääräisissä korjuukustannuksissa oli enimmillään 0,69 €/m³ Saimaan korjuualueella ja 0,79 €/m³ Pohjois-Pohjanmaan korjuualueella. Ponsse Dual ja Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla ovat kilpailukykyisimmät korjurikonseptit. Kyseisten konseptien välinen taloudellinen paremmuus riippuu suurelta osin siitä, kuinka paljon Valmet Combi konseptissa kuormatilaan puintia voidaan toteuttaa. Tehokkaammassa kuormaankatkonta -tapauksessa Valmet Combi -korjurin yksikkökustannukset vastasivat likimain korjuuketjun kustannuksia normaalin hakkuutaparakenteen leimikoilla, päätehakkuukohteilla sekä harvennuksilla.

Jos korjuuketjun kustannuksiin lisätään koneiden odotuksista kertyvät kustannukset, erot korjuuketjun ja korjareiden välillä pienenevät. Korjuuketjulle esitetyt alimmat kustannustasot edellyttävät tehokasta työaika- ja työvuorojärjestelyä, jota käytännössä ei täysin voida toteuttaa. Näin ollen korjuuketjun käytännössä toteutuvat korjuukustannukset ovat tuloksissa esitettyjen

kustannusarvojen (odotus – ilman odotusta) välillä. Tutkimuksessa korjuuketjun osalta kuormatraktorin toiminta kohdistui kiinteästi yhden hakkuukoneen hakkaaman ainespuun metsäkuljetukseen. Käytännössä kuormatraktori työ jakautuu osin myös toisen hakkuukoneen hakkaamien kohteiden metsäkuljetukseen. Tämän huomioiminen pienentää hieman metsäkuljetuksen yksikkökustannuksia.

Korjureiden merkittävimäksi kustannuseduksi korjuuketjuun nähden on todettu koneiden siirtokustannusten puolittuminen. Korjureiden kilpailukykyisyys tulee esille juuri kertymältään pienillä korjuukohteilla, jolloin siirtokustannuksen merkitys korostuu. Tässä tutkimuksessa korjurit olivat korjuuketjua kustannustehokkaampia kertymiltään alle 80–190 m³ leimikoissa hakkuutavasta ja korjurista riippuen. Korjureiden kilpailukykyinen kertymäraja leimikoilla kasvaa edelleen, jos korjureita suosivia muita korjuuolosuhteita on samanaikaisesti vallalla (lyhyt metsäkuljetusmatka, pieni hehtaariohtainen kertymä ja pitkä siirtomatka). Tuoreimmista eurooppalaisissa korjuritutkimuksissa korjureiden kilpailukykyraja korjuuketjuun nähden leimikon kertymän suhteen on vaihdellut 100 – 400 m³:n välillä (von Bodelschwing 2003, Wester ja Eliasson 2003, Emer 2005, Höglmeier 2007, Pisarek ja Väättäin 2007). Erityisesti Keski-Euroopan puunkorjuussa korjureille kilpailukykyinen leimikon hakkuukertymä voidaan todeta olevan Suomen vastaavaa arvoa suurempi. Tätä eroa pääosin selittävät Keski-Euroopassa vallalla olevat jatkuvan metsänkasvatuksen toimintatavat, metsäkoneiden käyttö yhdessä työvuorossa sekä eritoten korkeammat metsäkoneiden siirtokustannukset (Väättäin ym. 2007).

Normaalin hakkuutaparakenteen vallitessa korjuukustannukset olivat keskimäärin 48 % suuremmat Pohjois-Pohjanmaalla kuin Saimaan korjuualueella. Merkittävimmin eroa selittää Saimaan keskimääräisen korjuukohteen selvästi suurempi keskirunkokoko. Eroa selittää myös Saimaan suurempi kertymä leimikolla sekä lyhyemmät metsäkuljetus- ja siirtomatkat. Keskirunkokoon vaikutus havaitaan erityisesti päätehakkukohteiden simuloinneissa, joissa korjuukustannukset Pohjois-Pohjanmaalla olivat 63–67 % Saimaata suuremmat korjuukonseptista riippuen. Ensiharvennuskohdeiden simuloinneissa vastaava ero oli vain noin 10 %.

Konekonseptien korjuukustannusten väliset suhteet säilyivät hyvin samanlaisina, kun suhteellisia kustannuseroja verrattiin Saimaan ja Pohjois-Pohjanmaan korjuutilanteisiin. Myöskään korjureille kilpailukykyisten leimikoiden määrässä ei ollut merkittävää eroa korjuualueiden välillä. Näin ollen tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, etteivät korjuualueiden korjuuolosuhde-erot muuta korjureiden kilpailukykyä merkittävästi. Korjureille kilpailukykyisten päätehakkuleimikoiden lukumäärä kasvoi tosin kaikilla korjuukonsepteilla Pohjois-Pohjanmaalla Saimaan korjuualueeseen nähden. Vastaavasti kilpailukykyisten ylispuuhakkukohteiden määrä oli Saimaan korjuualueella Pohjois-Pohjanmaata suurempi, kun taas harvennusmäärät pysyivät likimain samalla tasolla molemmilla alueilla.

Korjuutilanteissa, joissa vuotuinen korjuusuorite eri korjuukonsepteilla jää Saimaan korjuualueella alle 25 000 m³ ja Pohjois-Pohjanmaalla alle 20 000 m³, Ponsse Dual ja Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla korjuukustannukset ovat korjuuketjun tasolla tai jopa alle sen. Korjuusuoritevertailut oli tehty perusleimikkopankin leimikoille, joten korjuumäärillä osoitettavat kannattavuusrajat muuttuisivat hakkuutaparakenteen vaihtuessa. Edellä esitetyt hakkuusuoritteet korjureilla tosin vaativat käytännössä korjuutoimintaa kahdessa vuorossa, jotta kyseisiin hakkuumääriin ylletäisiin.

Herkyysanalyysi osoitti eri muuttujamuutosten vaikutukset konekonseptien korjuukustannuksiin. Tarkastelua tehtiin erityisesti niihin työvaihemuuttujiin, jotka erosivat korjuuketjun vastavista arvoista. Herkyystarkastelu osoittaa korjureiden kilpailukykyyn paranemista, jos kyseisissä

työvaiheissa päästään kone- ja työtekniikan kehityksen myötä lähemmäksi korjuuketjun vastaavia ajanmenekkejä. Tarkastelussa korjuuketju osoittautui vielä hieman kustannustehokkaammaksi ratkaisuksi molemmilla korjuualueilla normaalin hakkuutaparakenteen vallitessa.

Korjuuketjun korjuun tasapainotusta tarkasteltiin analysoimalla korjuuketjun koneiden työskentelyyn kuluva aikaa leimikkotasolla. Kun kolmannen koneen, korjurin, lisäkäyttöön edellytettiin vähintään kahden työvuoron työpanosta, löytyi tarkastelun perusteella korjureille soveltuvia kohteita 2,1 % Saimaan ja 9,4 % Pohjois-Pohjanmaan korjuualueelta. Se, onko kannattavaa siirtää kolmas kone tasapainottamaan korjuuketjun puunkorjuuta leimikolla, riippuu erityisesti leimikon hakkuukertymästä. Kuten kertymän vaikutuksesta konekonseptin kustannuksiin sivulla 41 kuvista 21 ja 22 voidaan havaita, korjureilla korjuukustannus alkaa tasaantua 150–200 m³ jälkeen. Näin ollen eräänä kannattavuusrajana korjurin käytöstä korjuun tasapainottavana koneena olisi vähintään 150 m³:n korjuupanos korjurille epätasapainoleimikolla. Pienemmällä korjurin korjuukertymillä koneen siirtokustannukset kasvattavat korjuukustannuksia liikaa, jos siirto tehdään koneenkuljetusautolla.

Edellistä tarkastelua jatkaen on otettava huomioon myös se, että epätasapainoleimikot voivat ketjuuntua, jolloin koneyrittäjän korjuukaluston epätasapainotila voi kestää pidempäänkin. Korjureiden merkitys korjuutyön tasapainottajana korostuu entisestään, jos korjattavat epätasapainoleimikot sijaitsevat ryhmittyneenä toistensa lähellä siten, ettei siirtoja koneenkuljetusautolla tarvitse juuri tehdä. Korjuria kannattaa kuitenkin ensisijaisesti käyttää niissä epätasapainoleimikoissa, joissa korjuuvajetta ilmenee metsäkuljetuksen sijaan hakkuutyössä.

5 Päätelmät

Tutkimukseen laadittu koneellisen puunkorjuun simulointimalli mahdollisti erilaisten konekonseptien korjuutoiminnan luotettavan ja yksityiskohtaisen vertailtavuuden. Laajat historiatiedot korjuukohteiden hakkuista antavat hyvät mahdollisuudet aiempaa tarkempaan puunkorjuun toimintoanalyysiin simuloinnin keinoin. Korjuukohteiden simulointitulosteiden tilastollisella analysoinnilla voidaan myös laatia koneyrittäjäkohtaisia laskentamalleja, joita voidaan hyödyntää taloudellisimman konekonseptin valinnassa tuleville korjuukohteille.

Korjurin hankintaa pidetään koneyrittäjälle pienempänä riskinä kuin investoimista korjuuketjuun, sillä kalustoon sitoutuu vähemmän pääomaa. Pääomakustannuksilla on merkitystä konevalintaa tehtäessä erityisesti silloin, kun korjuuketjulle ei pystytä takaamaan täyttä työllisyyttä. Alue- ja avainyrittäjämallin yleistymisen parantaa mahdollisuuksia korjureiden läpimurtoon, sillä leimikkovarannon kasvaessa korjurit voidaan ohjata niille parhaiten sopiviin kohteisiin aikaisempaa paremmin. Useamman korjuuketjun yritysten kannattavuutta voitaneen joissakin tapauksissa parantaa siirtämällä heikosti kannattavia leimikoita korjureille ja vapauttamalla korjuuketjuja niille sopivampiin kohteisiin.

Korjuria on tähän saakka pidetty kompromissiratkaisuna, jolla sekä korjuun tuottavuus että käyttöaste jäävät erikoiskoneita alhaisemmiksi. Erityisesti kääntyvällä kuormatilalla varustetuilla korjureilla voidaan jo päästä erikoiskoneita suurempiin tuottavuuksiin, ja seurantatutkimuksissa korjureilla on saavutettu hyvä tekninen toimintavarmuus. Korjureiden tuottavuutta voidaan parantaa edelleen kone- ja työtekniisiä ratkaisuja kehittämällä, joten niiden vakiintuminen osaksi korjuukalustoa on hyvin todennäköistä.

Korjurit soveltuvat kertymältään pienille harvennus- ja päätehakkuille. Muita sopivia kohteita ovat esimerkiksi saaristometsät, myrskytuhoalueet ja siemenpuiden poistohakkuut. Simulointitutkimuksen mukaan korjureilla päästään normaaleja koneketjuja alempiin yksikkökustannuksiin pienillä, alle 100–200 m³:n leimikoilla. Korjureiden edullisuus korjuuketjuun nähden paranee edelleen kun hakkuukohteen hehtaarikohtainen kertymä ja metsäkuljetusmatka kohteella pienenevät. Korjurin kilpailukyky on siis parhaimmillaan sellaisilla leimikoilla, joita luonnehtivat pieni pinta-ala ja hakkuukertymä sekä lyhyt metsäkuljetusmatka ja pitkä koneiden siirtomatka (Emer 2005, Höglmeier 2006, Väättäinen ym. 2006b).

Korjuri on suositeltava vaihtoehto isomman konekaluston osaksi silloin, kun yrittäjällä on mahdollisuus valita korjattavat kohteet huolella. Myös pienillä koneyrittäjillä toiminta korjurilla voi olla kannattavaa, jos korjuukohteita allokoidaan kustannustehokkaasti eri konekonsepteille alueellisella tasolla. Tällainen toiminta voisi olla mahdollista esimerkiksi alueyrittäjän osayrittäjällä. Lisäksi yhden koneen korjuuyrittäjät pystyvät kahden koneen korjuuketjua paremmin turvautumaan konesiirtoihin ostopalveluna, eikä oman koneen kuljetusauton omistaminen ja käyttö tehokkaan puunkorjuun kannalta ole välttämätöntä (Väättäinen ym. 2006a).

Simulointitutkimuksessa Ponsse Dual ja kääntyvällä kuormatilalla varustettu Valmet Combi olivat kilpailukykyisimmät korjurikonseptit. Kääntyvällä kuormatilalla varustetun korjurin kilpailukyky perustui suorakuormauksen avulla saavutettuun suurempaan tuottavuuteen. Tuntikustannuksiltaan se oli 3–6 € kalliimpi kuin kiinteäkuormatilaiset korjurit. Korjattavan rungon koolla ei ollut juurikaan vaikutusta menetelmien edullisuuteen; perinteinen korjuuketju on aina noin 0,5–1 €/m³ edullisempi muuten keskimääräisissä hakkuuolosuhteissa. Alle 200 metrin lähikuljetusmatkalla Ponsse Dual pääsi lähes perinteisen ketjun kustannusten tasolle harvennuk-

silla ja Valmet Combi kääntyvällä kuormatilalla puolestaan muilla hakkuilla. Kyseisten konseptien välinen taloudellinen paremmuus riippuu merkittävästi siitä, kuinka paljon Valmet Combilta voidaan puida runkoja suoraan kuormatilaan. Suomessa suorakuormausmenetelmiä ei kuitenkaan vielä juuri käytetä. Ruotsissa kääntyvällä ja kallistettavalla kuormatilalla varustetut korjurit ja suorakuormaukseen perustuvat työmenetelmät ovat yleisempiä.

Tärkeänä korjureiden toimintatapana on korjuutyön tasapainottaminen vaihtelevissa ja muuttuvissa korjuutilanteissa, joissa pidempiaikainen korjuun epätasapainotila metsäkuljetuksen ja hakkuun välillä on mahdollinen. Korjureiden merkitys korjuutyön tasapainottajana korostuu entisestään, jos korjattavat epätasapainoleimikot sijaitsevat toistensa lähellä siten, ettei siirtoja koneenkuljetusautolla tarvitse juuri tehdä. Korjuuta tasapainotettaessa korjuria on korjuun kokonaiskustannusten kannalta kannattavampaa käyttää puutavaran hakkuussa kuin lähikuljetuksessa. Tämän kaltainen tilanne on Etelä-Suomea yleisempi Pohjois-Suomessa, jossa puukuu-tiometrin hakkuuseen kuluu keskimäärin enemmän aikaa kuin metsäkuljetukseen, pääosin pienemmästä rungonkoosta johtuen. Myös puuston laatutekijät voivat hidastaa hakkuutyötä merkittävästi, eritoten Pohjois-Suomessa.

Tutkimuksen korjurikonseptit voivat operoida valtaosassa suomalaisista puunkorjuukohteista. Yhdistelmäkouran tai hakkuulaitteen koko rajaavat kuitenkin pois ne hakkuukohteet, joissa rungon koko kasvaa suureksi (rinnankorkeusläpimitta yli 45-50 cm). Tällä hetkellä molemmat korjurikonseptit voidaan hakkuulaitteen koon perusteella luokitella ns. yleiskorjureiksi, joilla tehtävät hakkuut painottuvat pääosin normaali- tai pienipuustoisiiin korjuukohteisiin.

Korjuuketjuun verrattaessa korjurit eivät ole yhtä kustannusherkkiä vuotuisiin korjuumäärien muutoksiin. Korjuuketjun kilpailukyky korjureihin nähden heikkenee tosin vasta kun vuotuinen hakkuumäärä laskee alle 20 000 m³:iin. Yhden koneen pääoma- ja työvoimakustannukset jäävät pienemmiksi kuin kahden koneen ketjun silloin, kun ketju on vajaasti työllistetty.

Korjureiden kehityskaari on alkuvaiheessaan ja tuottavuutta parantavia sekä valmistuskustannuksia tasaavia koneteknisiä ratkaisuja on edelleen odotettavissa. Tutkimuksen herkkyytarkastelu korjureiden hankintahinnan ja työvaiheikkojen suhteen osoitti, että korjureiden keskimääräiset korjuukustannukset voivat laskea lähelle korjuuketjun vastaavia arvoja. Olennaisinta on kuitenkin se, että korjureiden teknologiakehityksen myötä korjureille kilpailukykyisten hakkuukohteiden määrä kasvaa entisestään. Siten korjuri on jatkossa kannattavaa viedä kertymältään yhä suuremmille leimikoille. Näkemystemme mukaan korjurilla voi olla jo lähitulevaisuudessa kannattavaa korjata kertymältään alle 250–300 m³:n hakkuukohteita, jolloin kohteet edustaisivat hakkuukertymältään 8,4–11,4 % Saimaan ja 15,3–20,8 % Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen hakkuukohteista. Korjurihakkuulle kannattavan kokonaiskertymän osuus kasvaa edellä esitetyistä, kun myös muita korjurille suotuisia erityiskorjuukohteita otetaan mukaan.

Erilaisia korjurikonsepteja käytetään myös energiapuunkorjuussa, jossa korjureille on löytymässä kilpailukykyinen toimintaympäristö (Kärhä ym. 2006, Laitila ja Asikainen 2006). Aines- ja energiapuunkorjuussa toimiville korjuuyrittäjille korjuri on monipuolinen peruskone, joka tuo toimintaan joustavuutta ja parantaa konseptin työllistymistä. Erityisesti energiapuuharvennuksilla korjuri helpottaa yrittäjän konekaluston ohjausta ja tasapainottaa koneiden tuottavuuseroja, sillä energiapuunkorjuuketjun kaatokasauskoneen tuottavuus on vain noin kolmannes kuorma-traktorin tuottavuudesta (Laitila ym. 2004). Tarpeen mukaan korjuria voi käyttää joko energia- tai ainespuun korjuussa, hakkuutyössä tai metsäkuljetuksessa, tai suorittaa kaikki korjuutehtävät samalla koneella. Korjureiden monikäyttöisyys tulee parantamaan niiden kannattavuutta, kun

samalla peruskoneella tehdään työmaakohteella useita työtehtäviä yhdellä käyntikerralla (Kärhä ym. 2007b).

Tulokset osoittavat, että tutkimuksen eri korjurikonsepteille on löydettävissä omat kustannustehokkaat toimintamallit suomalaisessa puunkorjuuympäristössä. Korjureiden kannattavan ja kustannustehokkaan käytön perusedellytyksenä on korjuukohteiden hallittu ohjaus kulloinkin taloudellisesti sopivimmalle konekonseptille. Tämä edellyttää sekä riittävän suuren korjuukohdevarannon että korjuukaluston hallintaa. Tulevaisuudessa korjurien kilpailukykyisyyden voidaan olettaa paranevan korjureiden kone- ja työtekniisten ominaisuuksien kehittyessä edelleen, korjuuyrittäjyyden toimintarakenteen siirtyessä enemmän alueyrittäjyyteen sekä kertymältään pienien korjuukohteiden lisääntyessä.

Kirjallisuus

- Andersson, J. 2002. Drivarens prestation i slutavverkning – en jämförelse av tre avverkningsmetoder. Studentuppsatser nr 56. Sveriges lantbruksuniversitetet. 24 s. + 3 liitettä.
- Asikainen, A. 1995. Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems. University of Joensuu, Faculty of Forestry, Research Notes 28. 86 s.
- Asikainen, A. 1998. Chipping terminal logistics. *Scan. J. For. Res.* V13(3):386-391.
- Asikainen, A. 2001. Simulation of logging and barge transport of wood from forests on islands. *International Journal of Forest Engineering.* Vol. 12.(2):43-50.
- Asikainen, A. 2004. Integration of Work Tasks and Supply Chains in Wood Harvesting - Cost Savings or Complex Solutions? *International Journal of Forest Engineering.* Vol. 15 No. 2, March 2004. 12 s.
- Asikainen, A. & Nuuja, J. 1999. Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. [The simulation of forest stand chipping and long-distance transporting of forest chips.] *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999:479-490.
- Asikainen, A., Ranta, T., Laitila, J. & Hämäläinen, J. 2001. Hakkuutähdehakkeen kustannustekijät ja suurimittakaavainen hankinta. Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan tiedonantoja 131. 108 s.
- Bergkvist, I., Norden, B. & Hallonborg, U. 2003. Drivaren är konkurrenskraftig. *Skogforsk. Resultat.* Nr. 14 2003. 4 s.
- Brunberg, T. 2004. Underlag till productionsnormer för skotare (Productivity norm data for forwarders). Redogörelse från skogforsk, nr 3/2004. 12 s.
- Emer, B. 2005. Simulation of harwarder concepts under Italian north-eastern Alps conditions. Pro gradu – työ. Università Degli Studi di Padova. Facoltà di Agraria, Dipartimento Territorio e Sistemi agro-forestali. 118 s.
- Hallonborg, U. 1998. Drivare – en analys av maskiner för avverkning och transport. Arbetsrapport Nr 392. *Skogforsk.* 26 s.
- Hallonborg, U., Bucht, S. & Olaison, S. 1999. Nya grepp i gallring – ”Sluten Upparbetning” minskar skadorna och ökar produktiviteten. *Resultat Nr 23. Skogforsk.* 4 s.
- Hallonborg, U. & Nordén, B. 2000. Räkna med drivare i slutavverkning. *Resultat Nr 21.* 4 s.
- Hallonborg, U., Nordén, B. & Lundström, H. 2005. Ponsse Dual Buffalo I slutavverkning. Arbetsrapport från Skogforsk nr 586. 12 s.
- Höglmeier, K. 2006. The Feasibility of Harwarders in CTL-logging in South-German Conditions. Report of Harwarder-project. Käsikirjoitus. Metsäntutkimuslaitos.
- Jylhä, P., Väätäinen, K., Rieppo, K. & Asikainen, A. 2006a. Aines- ja energiapuun hakkuu ja lähikuljetus korjureilla - Kirjallisuuskatsaus. Metlan työraportteja 34. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2006/mwp034.htm>. 40 s.
- Jylhä, P., Ala-Fossi, A., Väätäinen, K. & Sikanen, L. 2006b. Kuljettaja- ja yrittäjähaastattelut korjureiden käytöstä. *Hankeraportti* 26.6.2006. Metsäntutkimuslaitos. 20 s.
- Kangas, A. 2003. Valmet 801 Combi -yhdistelmäkonon vaikutus yrittäjän tulokseen UPM-Kymmene Metsän Utajärven tiimin alueella. Opinnäytetyö. Rovaniemen ammattikorkeakoulu, Metsätalous, Metsätalouden koulutusohjelma. 47 s.
- Kariniemi, A. 2006. Puunkorjuu ja kaukokuljetus vuonna 2005. Metsätehon katsaus 19/2006. 4 s.
- Kuitto, P.J., Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. *Metsätehon tiedotus* 410. 38 s. + 13 liites.
- Kärhä, K. (toim.) 2001. Harvennuspuiden koneelliset korjuuvaihtoehdot. HARKO-projektin (1999-2001) loppuraportti. Summary: Alternative Harvesting Systems in Mechanised Thinning. Final Report of HARKO project (1999-2001). *Työtehoseuran julkaisuja* 382. 93 s.
- Kärhä, K., Keskinen, S., Liikkanen, R. & Lindroos, J. 2006. Kokopuun korjuu nuorista metsistä. *Metsätehon raportti* 193. 79 s. + liites.
- Kärhä, K., Poikela, A., Rieppo, K., Imponen, V. & Vartiamaäki, T. 2007a. Korjurit ainespuun korjuussa. *Metsäteho Oy. Käsikirjoitus.*

- Kärhä, K., Rieppo, K. & Poikela, A. 2007b. Korjurilla lisää kustannustehokkuutta puunkorjuuseen. Koneyrittäjä 1/2007:10-12.
- Laitila, J., Asikainen, A., Sikanen, L., Korhonen, K.T. & Nuutinen, Y. 2004. Pienpuuhakkeen tuotannon kustannustekijät ja toimituslogistiikka. Metlan työraportteja 3. Saatavissa: <http://www.metla.fi/julkaisut/workingpapers/2004/mwp003.htm>. 57 s.
- Laitila, J. & Asikainen, A. 2006. Energy Wood Logging from Early Thinnings by Harwarder Method. *Baltic Forestry*, 12 (1):94-102.
- Lilleberg, R. & Korteniemi, P. 1997. Yhdistelmäkonne ensiharvennusemetsän puunkorjuussa. Metsätehon raportti 26. 22.7.1997. Metsäteho Oy. 25 s.
- Ljungdahl, S-G. 2004. Drivare i gallring – en jämförande studie av tre arbetsmetoder. Studentuppsatser nr 75. Sveriges lantbruksuniversitetet. 23 s. + liitteet.
- Metsä Trans 2006. Tilastot 2005. www-dokumentti. Saatavissa <http://www.metsatrans.com/tilastot06.pdf>
- Nordén, B., Lundström, H. & Thor, M. 2005. Kombimaskin jämfört med tvåmaskinsystem. Arbetsrapport nr. 606. Skogforsk. 10 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., Väätäinen, K. & Asikainen, A. 2006. The influence of the number of log assortments on logging productivity in CTL-loggings with Combi harwarders. Käsikirjoitus. Metsäntutkimuslaitos, Joensuun yksikkö.
- Pisarek, M., & Väätäinen, K. 2007. The mechanized harvesting cost comparison in Poland with harwarder options in thinnings. Käsikirjoitus.
- Rieppo, K. & Pekkola, P. 2001. Korjureiden käyttömahdollisuuksista. Metsätehon raportti 121. 51 s.
- Ryynänen, S. & Rönkkö, E. 2001. Harvennusharvestereiden tuottavuus ja kustannukset. Helsinki. Työtehosteuran julkaisuja 381. 67 s.
- Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Väitöskirja. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 694. 179 s.
- Sirén, M. & Aaltio, H. 2003. Productivity and costs of thinning harvesters and harvester-forwarders. *International Journal of Forest Engineering* 14(1): 39-48.
- Talbot, B., Nordfjell, T. & Suadicani, K. 2003. Assessing the utility of two integrated harvester-forwarder machine concepts through stand-level simulation. *International Journal of Forest Engineering* 14(2):31-43.
- Von Bodelschwing, E. 2003. The new Valmet 801 Combi first operational test results under Central European conditions. *Austro 2003: High Tech Operations for Mountainous Terrain*, October 5-9, 2003, Schlägk – Austria. 6 s.
- Väkevä, J., Kariniemi, A., Lindroos, J., Poikela, A., Rajamäki, J. & Uusi-Pantti, K. 2001. Puutavaran metsäkuljetuksen ajanmenekki. Metsätehon raportti 123. 41s.
- Väätäinen, K., L.Sikanen, and A.Asikainen, 2000. Rakeistetun puutuhkan metsäänpalautuksen logistiikka. [Logistics of returning granulated wood ash back to the forest.] Joensuun yliopiston metsätieteellisen tiedekunnan tiedonantoja 116. 99 s.
- Väätäinen, K., Ovaskainen, H., Ranta, P. & Ala-Fossi, A. 2005a. Hakkuukoneenkuljettajan hiljaisen tiedon merkitys hakkuutulokseen työpistetasolla. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 937, 90 s. + 10 liites.
- Väätäinen, K., Asikainen, A. & Eronen, J. 2005b. Improving the logistics of biofuel reception at the power plant of Kuopio city. *International Journal of Forest Engineering* 16(1): 51-64.
- Väätäinen, K., Asikainen, A. & Sikanen L. 2006a. Metsäkoneiden siirtokustannusten laskenta ja merkitys puunkorjuun kustannuksissa. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/2006:391-397.
- Väätäinen, K., Liiri, H. & Röser, D. 2006b. Cost-competitiveness of harwarders in CTL-logging conditions in Finland – a discrete-event simulation study at the contractor level. Teoksessa: P.A. Ackerman, D.W. Ländin & M.C. Antonides (ed.). *Precision Forestry in Plantations, Semi-Natural and Natural Forests. Proceedings of the International Precision Forestry Symposium*. Stellenbosch University, South Africa. 5 - 10 March 2006. s. 451-462.

- Väätäinen, K., Asikainen, A., Liiri, H., Jylhä, P. & Sikanen, L. 2007. Korjureiden simulointi ainespuun korjuussa. Loppuraportti hankkeelle: Yhdistelmäkoneiden simulointi aines- ja energiapuun korjuussa. TEKES-loppuraportti. 12 s.
- Wester, F. & Eliasson, L. 2003. Productivity in Final Felling and Thinning for a Combined Harvester-Forwarder (Harwarder). *International Journal of Forest Engineering* 14(2):45-51.

LIITE 1 HAKKUUN MALLIT**HARVENNUSHAKKUUN** (ensiharvennus, muu harvennus)**1. Siirtymä, s/runko**

Ryynänen ja Rönkkö (2001), Sirén (1998), Väätäinen ym. (2005), Kuitto (1994), Korjuri-hanke (2004-)

$$S_{K,P} = 26,175 - 3,302 * \ln(a)$$

$$S_V = 26,175 - 3,302 * \ln(a) + f_{V1}$$

missä,

S = siirtymä, s / runko

a = runkopoistuma, runkoa / ha

f_{V1} = 1,0 (korjaustekijä Valmet Combille)

2. Hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato, s/runko

Ryynänen ja Rönkkö (2001), Sirén (1998), Väätäinen ym. (2005), Nurminen ym. (2006)

$$V_K = 11,397 + 13,068 * b - 4,5 * b^2$$

$$V_P = (11,397 + 13,068 * b - 4,5 * b^2) * f_{P2}$$

$$V_V = (11,397 + 13,068 * b - 4,5 * b^2) * f_{V2}$$

missä,

V = hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato, s/runko

b = rungon koko, m³

f_{P2} = 1,05 (korjaustekijä Ponsse Dualille)

f_{V2} = 1,05 (korjaustekijä Valmet Combille)

3. Karsinta ja katkonta, s/runko

Ryynänen ja Rönkkö (2001), Sirén (1998), Väätäinen ym. (2005), Nurminen ym. (2006)

$$K_{Kh} = 5,302 + 60,232 * b$$

$$K_{Kl} = 5,302 + 60,232 * b + 15 * b^2$$

$$K_{Ph} = (5,302 + 60,232 * b) * f_{P3}$$

$$K_{Pl} = (5,302 + 60,232 * b + 15 * b^2) * f_{P3}$$

$$K_{Vh} = (5,302 + 60,232 * b + 5 * b^2) * f_{V3}$$

$$K_{Vl} = (5,302 + 60,232 * b + 20 * b^2) * f_{V3}$$

missä,

K = karsinta ja katkonta, s/runko

Kh = korjuuketju, havupuut

Kl = korjuuketju, lehtipuut

Ph = PonsseDual, havupuut

Pl = PonsseDual, lehtipuut

Vh = ValmetCombi, havupuut

Vl = ValmetCombi, lehtipuut

b = rungon koko, m³

f_{P3} = 1,05 (korjaustekijä Ponsse Dualille)

f_{V3} = 1,1 (korjaustekijä Valmet Combille)

4. Apuaika

Ryynänen ja Rönkkö (2001), Sirén (1998), Väättäinen ym. (2005), Nurminen ym. (2006)

Apuaikaan sisältyy muun muassa raivausta, latvusten siirtoa, ainespuun kasausta ja työn suunnittelua.

$$A_h = 4,0 \text{ (sekuntia/runko)}$$

PÄÄTEHAKKU (päätehakkuu, ylispuiden poisto, siemenpuuhakkuu, kaistalahakkuu, suojuspuuhakkuu, erikoishakkuu)

1. Siirtymä, s/runko

Kuitto (1994)

$$S_{K,P} = (-0,6347 + 0,000219 * a + \frac{945,36}{a + 1060}) * 60$$

$$S_V = (-0,6347 + 0,000219 * a + \frac{945,36}{a + 1060}) * 60 + f_{V4}$$

missä,

S = siirtymä, s / runko

a = poistuma, runkoa / ha

f_{V4} = 0,3 (korjaustekijä Valmet Combille)

2. Hakkuulaitteen vienti ja kaato, s/runko

Nurminen ym. (2006)

$$V = (0,17 + 0,124 * b) * 60$$

$$V_{P1} = (0,17 + 0,124 * b) * 60 * f_{P2} \quad (\text{ehtolauseke})$$

$$V_{P2} = ((0,17 + 0,124 * b) * 60 + 2 * b^2) * f_{P2} \quad (\text{ehtolauseke})$$

$$V_{V1} = (0,17 + 0,124 * b) * 60 * f_{V2} \quad (\text{ehtolauseke})$$

$$V_{V2} = ((0,17 + 0,124 * b) * 60 + 2 * b^2) * f_{V2} \quad (\text{ehtolauseke})$$

missä,

$V =$ Hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato, s/runko

$P1$ ja $V1 =$ ehtolauseke, voimassa kun rungon koko $b < 1,0$ ($P =$ Ponsse, $V =$ Valmet)

$P2$ ja $V2 =$ ehtolauseke, voimassa kun rungon koko $b > 1,0$ ($P =$ Ponsse, $V =$ Valmet)

$b =$ rungon koko, m^3

$f_{P2} = 1,05$ (korjaustekijä Ponsse Dualille)

$f_{V2} = 1,05$ (korjaustekijä Valmet Combille)

3. Karsinta ja katkonta, s/runko

Nurminen ym. (2006)

$$K_{Kh} = (0,1385 + 0,335 * b + 0,064 * b^2) * 60$$

$$K_{Kl} = (0,079 + 0,655 * b + 0,174 * b^2) * 60$$

$$K_{Ph} = ((0,1385 + 0,335 * b + 0,064 * b^2) * 60 + 2 * b^2) * f_{P3}$$

$$K_{Pl} = ((0,079 + 0,655 * b + 0,174 * b^2) * 60 + 4 * b^2) * f_{P3}$$

$$K_{Vh} = ((0,1385 + 0,335 * b + 0,064 * b^2) * 60 + 6 * b^2) * f_{V3}$$

$$K_{Vl} = ((0,079 + 0,655 * b + 0,174 * b^2) * 60 + 8 * b^2) * f_{V3}$$

missä,

$K =$ karsinta ja katkonta, s/runko

$Kh =$ korjuuketju, havupuut

$Kl =$ korjuuketju, lehtipuut

$Ph =$ PonsseDual, havupuut

$Pl =$ PonsseDual, lehtipuut

$Vh =$ ValmetCombi, havupuut

$Vl =$ ValmetCombi, lehtipuut

$b =$ rungon koko, m^3

$f_{P3} = 1,05$ (korjaustekijä Ponsse Dualille)

$f_{V3} = 1,1$ (korjaustekijä Valmet Combille)

4. Apuaika, s/runko

Väätäinen ym. (2005), Nurminen ym. (2006)

Apuaika on kaikille konekonsepteille sama. Apuaikaan sisältyy muun muassa raivausta, latvusten siirtoa, ainespuun kasausta ja työn suunnittelua.

$$A_p = 5,0 \text{ (sekuntia/runko)}$$

5. Muut ajanmenekit

Ajo hakkuualalle ja takaisin

Perusmallissa hakkuukone ja Ponsse Dual siirtyvät hakkuualalle kerran uuden leimikon alussa ja hakkuukohteen viimeisen hakattavan rungon jälkeen saapuvat tienvarsivarastolle. Ponsse Dual konseptille käytettiin yhtä korjuutavan vaihtoa (hakkuukoneesta ajokoneeksi) korjuulohkoa kohden hakkuukertymästä riippumatta. Siirtymä alussa ja lopussa on sama kuin hakkuukohteen keskimääräinen metsäkuljetusmatka ja ajanmenekki saadaan kuormatraktorin tyhjänä ajon nopeuden mallista (Kuitto 1994). Valmet Combin osalta korjuun alun ja lopun siirtymät sisältyvät jo aiemmin esitettyihin siirtymiin (ajo tyhjänä ja kuormattuna).

Korjuutavan vaihto hakkuusta metsäkuljetukseen ja päinvastoin (Ponsse Dual)

Ponsse Dualin työtavan vaihtoaika hakkuukoneesta kuormatraktoriksi ja päinvastoin on simuloitumallissa asetettu 20 minuutiksi.

METSÄKULJETUKSEN MALLIT**1. Ajo tyhjänä, min/m³ (maastoluokassa 1)**

Väkevä ym. (2001)

$$AT_{K,P} = \frac{m_2}{n_2 * c_{1,2,3}} * \frac{1}{d}$$

$$AT_V = \frac{m_2}{n_2 * c_{1,2,3}} * \frac{1}{d} * f_{V_4}$$

*missä,**AT = Tyhjänäajon ajanmenekki, min/m³**m₂ = tyhjänäajon matka, m, = 2 * m₀ - m₁**m₀ = keskilähtömatka, m**m₁ = Kuormattuna - ajon matka, m = m₀ - $\frac{m_3}{2}$* *m₃ = Kuormausajomatka, m = d * s (s, katso seur. mallista)**n₂ = Tyhjänäajon nopeus, m/min = [0,10492 * ln(1,02966 * m₂ - 3,12)] * 100**c₁ = 1,00 (maastoluokka, ML 1)**c₂ = 0,75 (maastoluokka, ML 2)**c₃ = 0,59 (maastoluokka, ML 3)**f_{V₄} = 1,1 (korjaustekijä Valmet Combille)**d = kuormankoko, m³***2. Kuormaus, min/m³**

Väkevä ym. (2001), Brunberg (2004)

$$K_{tukkipuu} = \frac{\left[52,6278 - 0,02057 * z + \frac{13898,4548}{z + 111,5614} \right] * a_1 * b_1 * c}{100}$$

$$K_{kuitupuu} = \frac{\left[52,6278 - 0,02057 * z + \frac{13898,4548}{z + 111,5614} \right] * (1,099 + 0,00166 * z) * a_2 * b_2 * c}{100}$$

$$K_K = (s * K_{tukkipuu} + (1 - s) * K_{kuitupuu}) + 0,3 * (-0,1 + 0,1 * i)$$

$$K_P = \left[(s * K_{tukkipuu} + (1 - s) * K_{kuitupuu}) + 0,3 * (-0,1 + 0,1 * i) \right] * f_{Ph, Pp}$$

$$K_V = \left[(s * K_{tukkipuu} + (1 - s) * K_{kuitupuu}) + 0,3 * (-0,1 + 0,1 * i) \right] * f_{V7} + f_{V8}$$

missä,

$$K_{tukkipuu} = \text{Tukkipuun kuormauksen ajanmenekki, min/}^3$$

$$K_{kuitupuun} = \text{Kuitupuun kuormauksen ajanmenekki, min/}^3$$

$$z = \text{Työmaan keskijäreys, dm}^3$$

a_1 ja a_2 = puutavaralajin suhteellinen ajanmenekki (taulukko alla)

b_1 ja b_2 = hakkuutavan suhteellinen ajanmenekki (taulukko alla)

c = pölkkyjen ja kasojen järjestelyajan kerroin

$$\text{harvennushakkuu} = 1,032 \quad \text{päätehakkuu} = 1,016$$

s = tukkipuun suhteellinen osuus/100

i = puutavaralajimäärä, kpl

f_{ph} = Ponsse Dualin aikakorjaus, 0,95 (harvennus)

f_{pp} = Ponsse Dualin aikakorjaus, 0,9 (päätehakkuu)

$$f_{v7} = \text{Valmet Combin aikakorjaus, } = [(100 + 3,438 * \ln(g_v) + 1,186) / 100]$$

g_v = puutavaralajien keskim. ajouravarsitiheys, $m^3/100m$

$$f_{v8} = 0,052 / (e_{h,p} \sqrt{g})$$

g = ajouravarsitiheys, $m^3/100m$ (kaikki puutavaralajit)

$[0,052 / (e_h \sqrt{g_v}) = \text{Valmet Combin hytinkäännön aika kuutiometrille}]$

e_h = 0,21249 (kerroin harvennukselle)

e_p = 0,33599 (kerroin päätehakkuulle)

Tukkipuulle:

Hakkuutapa	Puutavaralaji	Kerroin	
		a_1	b_1
Päätehakkuu	Havutukki	1,00	1,00
	Lehtitukki	1,11	1,00
Harvennushakkuu	Havutukki	1,00	1,30
	Lehtitukki	1,11	1,30

Kuitupuulle:

Hakkuutapa	Puutavaralaji	Kerroin	
		a_2	b_2
Päätehakkuu	Havukuitu 5m	1,00	1,00
	Lehtikuitu 5m	1,11	1,00
Harvennushakkuu	Havukuitu 5m	1,00	1,36
	Lehtikuitu 5m	1,11	1,36

3. Kuormauksen aikainen ajo, min/m³ (Vain korjuuketjulle ja Ponsse Dualille) Väkevä ym. (2001)

$$A_{kah} = s * b_h$$

$$A_{kap} = s * b_p$$

missä,

A = kuormauksen aikainen ajo, min/m³

h = harvennus

p = päätehakkuu

$$s = \text{kuormausajomatka, m/m}^3, = \frac{64,864}{\sqrt{g}}$$

g = ajouravarsitiheys, m³/100 m (puutavaralajien yhteistiheys)

b_h = 0,03863 min/m (maastoluokassa 1)

b_p = 0,03678 min/m (maastoluokassa 1)

4. Ajo kuormattuna, min/m³

Väkevä ym. (2001)

$$AK_{K,P} = \frac{m_1}{n_1 * c} * \frac{1}{d}$$

$$AK_V = \frac{m_1}{n_1 * c} * \frac{1}{d} * f_{V_4}$$

missä,

AK = Kuormattuna – ajon ajanmenekki, min/m³

$$m_1 = \text{Kuormattuna – ajon matka, m} = m_0 - \frac{m_3}{2}$$

m_3 = Kuormausajomatka, m = d * s (s, katso ed. mallista)

n_1 = Kuormattuna – ajon nopeus, m/min = [0,058272 * ln(18,1013 * m_1 – 53,7465)] * 100

c_1 = 1,00 (maastoluokka, ML 1)

c_2 = 0,62 (maastoluokka, ML 2)

c_3 = 0,53 (maastoluokka, ML 3)

f_{V_4} = 1,1 (korjaustekijä Valmet Combille)

d = kuormankoko, m³

5. Purku, min/m³

Väkevä ym. (2001) , Brunberg (2004)

$$P_K = (b_{1,2,3,4} + f + g) * c + 0,7 * (-0,1 + 0,1 * i)$$

$$P_P = [(b_{1,2,3,4} + f + g) * c + 0,7 * (-0,1 + 0,1 * i)] * f_{P7}$$

$$P_V = [(b_{1,2,3,4} + f + g) * c + 0,7 * (-0,12 + 0,12 * i)] * f_{V7}$$

missä,

$$P = \text{purkamisen ajanmenekki, min/m}^3$$

b = varsinainen purkamisaika, min/m³ (alla puutavaralajeittain)

$$b_1 = 0,55 \text{ havutukki}$$

$$b_2 = 0,77 \text{ lehtitukki}$$

$$b_3 = 0,58 \text{ havukuitu 5m}$$

$$b_4 = 0,73 \text{ lehtikuitu 5m}$$

$$f = 0,067 \text{ min/m}^3 \text{ purkamispaikalla ajot keskimäärin}$$

$$g = 0,024 \text{ min/m}^3 \text{ muut työt purkamisen yhteydessä keskim.}$$

$$c = 1,007 \text{ pölkkyjen ja kasojen järjestelyajan kerroin (harvennus 1,008, muu 1,007)}$$

$$i = \text{puuta var alajeja, kpl}$$

$$f_{P7} = 0,9$$

$$f_{V7} = 1,3$$

VALMET COMBI KÄÄNTYVÄLLÄ KUORMATILALLA

Valmet Combin (kääntyvä kuormatila) osalta malliketjut ajanmenekeissä muuttuivat muutamien päätyövaiheiden osalta. Näitä työvaiheita olivat hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato sekä rungon karsinta ja katkonta. Puutavaralajien kuormauksen ajanmenekkiin huomioidaan vain se osa hakatusta puusta, joka on prosessoitu maahan.

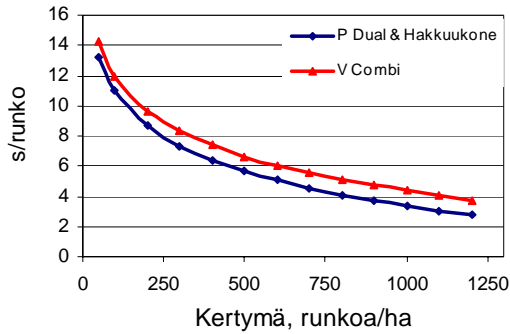
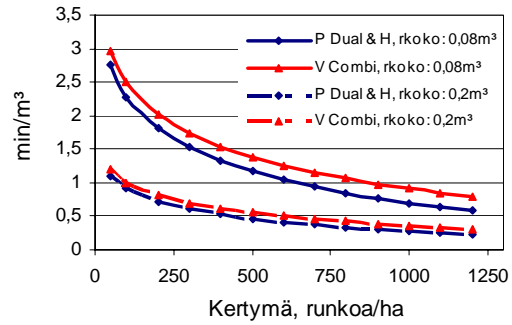
Kääntyvän kuormatilan vaihtoehdossa 1 (VE1) suorakuormauksen osuus harvennuskohteilla oli 30 % ja muilla kohteilla 90 %, kun taas vaihtoehdossa 2 (VE2) harvennuksilla suorakuormauksen osuus oli 50 % ja vastaavasti muilla hakkuilla 99 %. Jokaiseen suorakuormatun rungon kaato- sekä karsinta ja katkonta-aikaan lisättiin 15 %:n lisätyöosuus, mikä koostui kaadon ohjauksesta, kaadetun rungon siirrosta kuormatilaan sekä kuormatilan suuntauksesta.

LIITE 2

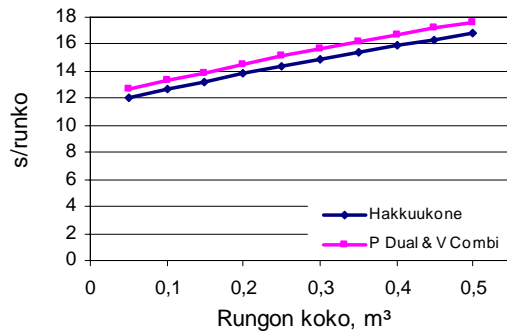
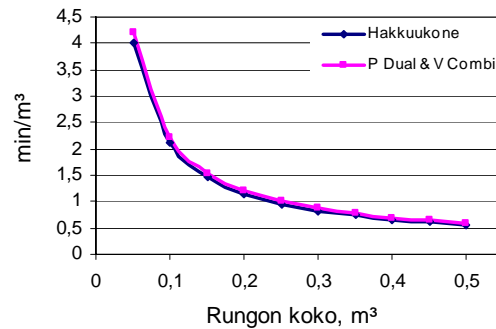
Päätyövaiheiden ajanmenekkimallien graafinen esitys

Hakkuutyö harvennushakkuilla:

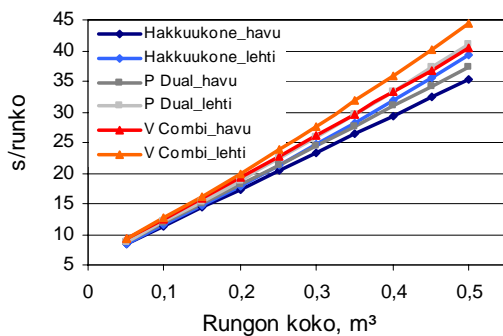
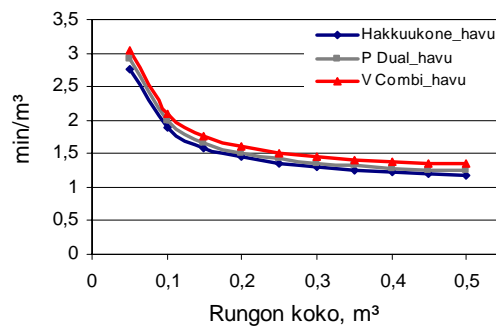
Siirtymä, s/runko

Siirtymä, min/m³

Hakkuulaitteen venti ja rungon kaato, s/runko

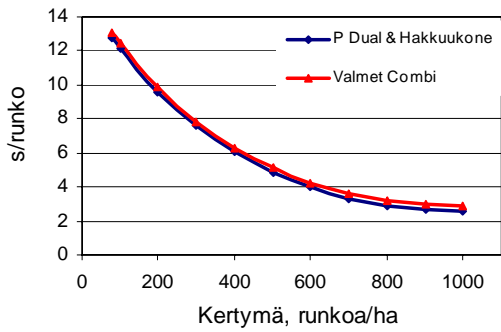
Hakkuulaitteen venti ja rungon kaato, min/m³

Karsinta ja katkonta, s/runko

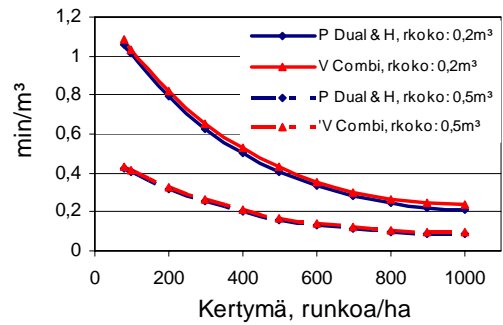
Karsinta ja katkonta, min/m³

Hakkuutyö uudistushakkuilla:

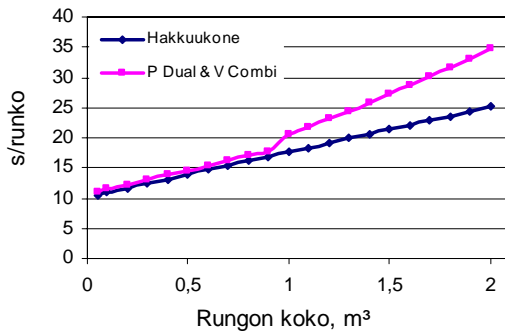
Siirtymä, s/runko



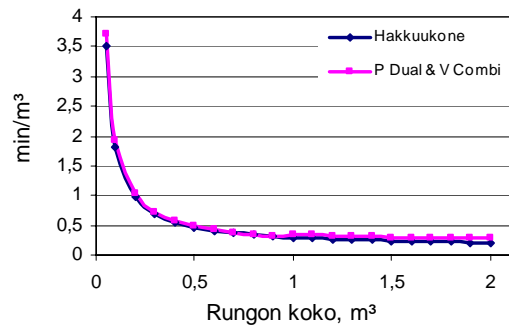
Siirtymä, min/m³



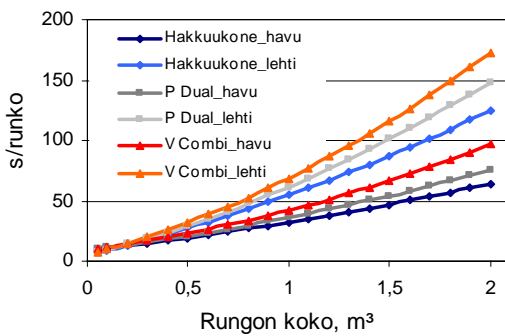
Hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato, s/runko



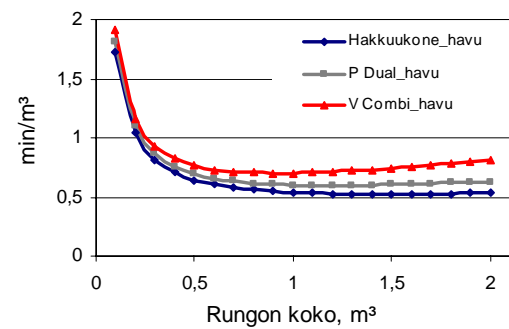
Hakkuulaitteen vienti ja rungon kaato, min/m³



Karsinta ja katkonta, s/runko

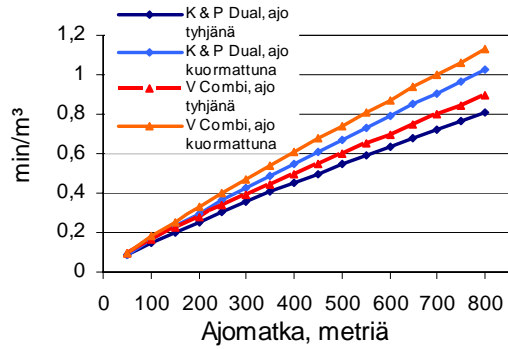


Karsinta ja katkonta, min/m³

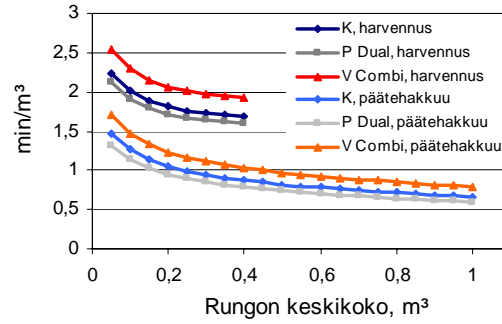


Metsäkuljetus:

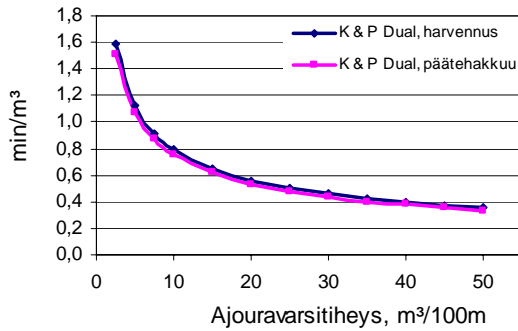
Tyhjänä ja kuormattuna ajo, min/m³



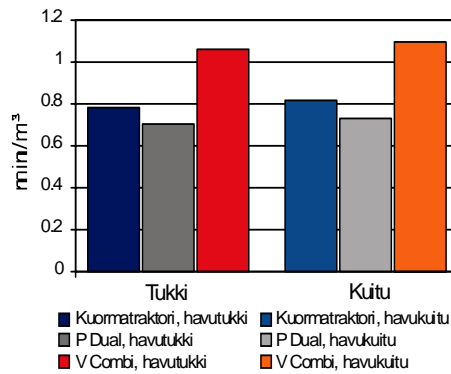
Kuormaus, min/m³



Kuormauksen aikainen ajo, min/m³



Purku, min/m³ (puutavaralajeja 3 kpl)



LIITE 3 Konekonseptien korjuukustannusmallien (lineaarinen regressiomalli) tilastolliset suureet

Saimaan korjuualueen harvennuskohteet:

Konekonsepti	R ²	F-arvo	p	n	Termi*	kerroin-estimaatti	Sd-error	t-arvo	p
Ponsse Dual	92,8	2130,08	<0,001	831	b ₀	2,608	0,248	10,528	<0,001
					v ^{-0,320}	6,891	0,088	77,888	<0,001
					m	0,004	0,000	39,836	<0,001
					1/k	135,132	0,055	-26,477	<0,001
					ln(a)	-1,458	7,097	19,041	<0,001
					s	0,004	0,002	2,430	0,015
Valmet Combi _{Kiint}	97,1	5551,88	<0,001	831	b ₀	-0,034	0,153	-0,225	0,822
					v ^{-0,325}	7,504	0,054	139,561	<0,001
					m	0,004	0,000	60,463	<0,001
					1/k	128,026	4,376	29,254	<0,001
					ln(a)	-0,622	0,034	-18,116	<0,001
					s	0,003	0,001	2,305	0,021
Valmet Combi _{Käänt}	96,9	5161,19	<0,001	831	b ₀	-0,072	0,160	-0,449	0,653
					v ^{-0,327}	7,456	0,056	134,018	<0,001
					m	0,004	0,000	60,722	<0,001
					1/k	123,744	4,502	27,486	<0,001
					ln(a)	-0,645	0,036	-17,971	<0,001
					s	0,003	0,001	2,622	0,008
Korjuuketju	95,0	3138,62	<0,001	831	b ₀	2,155	0,326	8,576	<0,001
					v ^{-0,338}	6,195	0,112	55,694	<0,001
					m	0,003	0,000	21,426	<0,001
					1/k	240,431	9,544	26,499	<0,001
					ln(a)	-1,355	0,074	-20,738	<0,001
					s	0,011	0,002	3,618	<0,001

*Korjuukustannusmallien termit ja yksiköt:

b₀ = vakiotermiv^x = keskirungonkoon potenssi, m³

m = metsäkuljetusmatka, m

1/k = leimikkokertymän käänteisluku, m³ln(a) = ajouravarsitiheyden luonnonlogaritmi, m³/100m

s = siirtoetäisyys, km

Saimaan korjuualueen uudistushakkuukohteet:

Konekonsepti	R ²	F-arvo	p	n	Termit*	kerroin- estimaatti	Sd-error	t-arvo	p
Ponsse Dual	88,0	1629,49	<0,001	1111	b ₀	1,891	0,185	10,232	<0,001
					v ^{-0,297}	5,875	0,117	50,294	<0,001
					m	0,004	0,000	41,721	<0,001
					1/k	137,590	4,672	29,448	<0,001
					ln(a)	-0,968	0,030	-32,168	<0,001
					s	0,004	0,001	3,001	<0,001
Valmet Combi _{kiint}	93,2	3046,31	<0,001	1111	b ₀	-0,260	0,121	-2,153	0,032
					v ^{-0,326}	6,136	0,072	85,693	<0,001
					m	0,004	0,000	57,572	<0,001
					1/k	131,927	3,215	41,039	<0,001
					ln(a)	-0,269	0,021	-12,826	<0,001
					s	0,005	0,001	5,433	<0,001
Valmet Combi _{käänt}	93,9	3404,62	<0,001	1111	b ₀	-0,298	0,112	-2,669	0,008
					v ^{-0,344}	5,621	0,067	84,117	<0,001
					m	0,004	0,000	65,970	<0,001
					1/k	135,448	2,911	46,529	<0,001
					ln(a)	-0,298	0,019	-15,486	<0,001
					s	0,005	0,001	6,115	<0,001
Korjuuketju	92,4	2807,24	<0,001	1111	b ₀	1,420	0,212	8,372	<0,001
					v ^{-0,320}	4,993	0,122	40,270	<0,001
					m	0,003	0,000	25,541	<0,001
					1/k	248,253	5,870	44,382	<0,001
					ln(a)	-0,786	0,038	-22,879	<0,001
					s	0,009	0,002	4,242	<0,001

*Korjuukustannusmallien termit ja yksiköt:

b₀ = vakiotermi

v^x = keskirungonkoon potenssi, m³

m = metsäkuljetusmatka, m

1/k = leimikkokertymän käänteisluku, m³

ln(a) = ajouravarsitiheyden luonnonlogaritmi, m³/100m

s = siirtoetäisyys, km

Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen harvennuskohteet:

Konekonsepti	R ²	F-arvo	p	n	Termi*	kerroin- estimaatti	Sd-error	t-arvo	p
Ponsse Dual	91,6	2040,09	<0,001	941	b ₀	3,925	0,310	12,660	<0,001
					v ^{-0,364}	5,800	0,093	62,313	<0,001
					m	0,004	0,000	35,158	<0,001
					1/k	146,221	5,674	25,771	<0,001
					ln(a)	-1,533	0,063	-24,433	<0,001
					s	0,004	0,001	3,662	<0,001
Valmet Combi _{Kiint}	95,8	4246,59	<0,001	941	b ₀	0,805	0,214	3,755	<0,001
					v ^{-0,377}	6,365	0,062	103,363	<0,001
					m	0,004	0,000	49,061	<0,001
					1/k	147,267	3,941	37,365	<0,001
					ln(a)	-0,652	0,044	-14,695	<0,001
					s	0,007	0,001	7,757	<0,001
Valmet Combi _{Käänt}	95,6	4046,91	<0,001	941	b ₀	1,041	0,222	4,683	<0,001
					v ^{-0,385}	6,210	0,062	99,943	<0,001
					m	0,004	0,000	48,460	<0,001
					1/k	145,855	4,175	34,935	<0,001
					ln(a)	-0,759	0,047	-16,282	<0,001
					s	0,006	0,001	6,366	<0,001
Korjuuketju	92,8	2406,91	<0,001	941	b ₀	2,352	0,414	7,617	<0,001
					v ^{-0,373}	5,593	0,126	44,725	<0,001
					m	0,003	0,000	21,007	<0,001
					1/k	283,972	7,513	39,303	<0,001
					ln(a)	-1,392	0,083	-19,689	<0,001
					s	0,013	0,002	8,555	<0,001

*Korjuukustannusmallien termit ja yksiköt:

b₀ = vakiotermi

v^x = keskirungonkoon potenssi, m³

m = metsäkuljetusmatka, m

1/k = leimikkokertymän käänteisluku, m³

ln(a) = ajouravarsitiheyden luonnonlogaritmi, m³/100m

s = siirtoetäisyys, km

Pohjois-Pohjanmaan korjuualueen uudistushakkuukohteet:

Konekonsepti	R ²	F-arvo	p	n	Termi*	kerroin- estimaatti	Sd- error	t-arvo	p
Ponsse Dual	93,7	2979,39	<0,001	1002	b ₀	2,254	0,216	10,456	<0,001
					v ^{-0,361}	5,737	0,071	81,273	<0,001
					m	0,004	0,000	39,054	<0,001
					1/k	157,494	5,145	30,609	<0,001
					ln(a)	-1,405	0,043	-33,060	<0,001
					s	0,004	0,001	4,424	<0,001
Valmet Combi _{Kiinti}	95,8	4597,15	<0,001	1002	b ₀	-0,645	0,166	-3,880	0,032
					v ^{-0,369}	6,310	0,053	118,883	<0,001
					m	0,004	0,000	46,912	<0,001
					1/k	151,926	3,932	38,640	<0,001
					ln(a)	-0,511	0,033	-15,416	<0,001
					s	0,006	0,001	7,828	<0,001
Valmet Combi _{Käänt}	95,9	4663,14	<0,001	1002	b ₀	-0,516	0,162	-3,182	0,002
					v ^{-0,393}	5,606	0,048	117,079	<0,001
					m	0,004	0,000	48,836	<0,001
					1/k	154,478	3,988	38,737	<0,001
					ln(a)	-0,617	0,033	-18,445	<0,001
					s	0,006	0,001	7,686	<0,001
Korjuuketju	93,4	2820,69	<0,001	1002	b ₀	0,887	0,268	2,877	0,004
					v ^{-0,359}	5,687	0,090	64,273	<0,001
					m	0,003	0,000	24,901	<0,001
					1/k	298,380	6,344	51,352	<0,001
					ln(a)	-1,250	0,052	-23,698	<0,001
					s	0,012	0,012	9,872	<0,001

*Korjuukustannusmallien termit ja yksiköt:

b₀ = vakiotermi

v^x = keskirungonkoon potenssi, m³

m = metsäkuljetusmatka, m

1/k = leimikkokertymän käänteisluku, m³

ln(a) = ajouravarsitiheyden luonnonlogaritmi, m³/100m

s = siirtoetäisyys, km