



■ Antti Asikainen



■ Jaakko Nuuja

Antti Asikainen ja Jaakko Nuuja

Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi

Asikainen, A. & Nuuja, J. 1999. Palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen simulointi. *Metsätieteen aikakauskirja* 3/1999: 479–490.

Tutkimuksessa mallitettiin palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen muodostama energia-puun toimitusketju. Haketuksen ja kaukokuljetuksen kustannuksia tutkittiin simulointimallin avulla. Haketus suoritettiin palstahakurilla ja hake kuljetettiin vaihtokonttiautolla, täysperävaunullisella tai puoliperävaunullisella hakeautolla. Lisäksi mallitettiin ketju, jossa puoliperävaunullinen hakeauto ajoi lisäksi turvetta.

Ketjujen ominaisuudet selvitettiin aiemmin tehtyjen hakeharvesteria ja hakeautoja koskevien tutkimusten pohjalta. WITNESS-simulointiohjelmistolla rakennettiin simulointimallit joiden perusteella ketjujen ominaisuuksia vertailtiin. Hakettavien kohteiden tiedot luotiin TASO-laskennan kuviotietojen perusteella.

Simulointitulosten perusteella koneiden välinen kiinteä vuorovaikutus oli merkittävä tekijä kokonaiskustannusten muodostumisessa. Sekä hakeharvesterin että hakeauton ajasta kului huomattava osa odotuksiin, mikä nosti korjuun kokonaiskustannuksia.

Laaditut simulointimallit tulee sovittaa toimivaan yritys ympäristöön ja suorittaa simulointimalleille yksityiskohtaisemmat herkkyysoanalyysit, jotta malleja voitaisiin käyttää päätöksenteon apuvälineinä. Simulointimallien tarkkuutta voidaan parantaa käyttämällä hyväksi laajempia tutkimuksia ketjun koneiden ominaisuuksista.

Asiasanat: palstahaketus, simulointi, logistiikka, metsäenergia

Yhteystiedot: Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta, PL 111, 80101 Joensuu.

Faksi (013) 251 3590, sähköposti antti.asikainen@joensuu.fi

Hyväksytty 20.4.1999

1 Johdanto

Hakkuutähdehakeen hankinnassa on käytetty sekä murskaukseen että haketukseen perustuvia menetelmiä. Haketus voidaan tehdä joko palstalla, välivarastolla, haketerminaalissa tai käyttöpaikalla. Käyttöpaikalla tai terminaalissa tapahtuvassa haketuksessa saavutetaan korkeampi tuottavuus kuin vastaavalla kalustolla tienvarsivarastolla (Asikainen 1995). Tienvarsivarastolla hakettaessa syntyvät odotusajat voidaan välttää käyttöpaikkahaketuksessa, sillä hakkuutähdehakeen kaukokuljetuksen ja haketuksen välissä voidaan pitää suurta puskurivarastoa (Asikainen 1995, Hakkila ym. 1998). Palstahaketuksella tarkoitetaan menetelmiä, joissa energiapuu haketetaan palstalla tai ajouralla. Avohakkuissa palstahakkuri voi liikkua vapaasti leimikon alueella, mutta harvennushakkuissa sen on pysyttävä ajourilla. Haketus tapahtuu hakkuriyksikön perävaunuun tai säiliöön, josta hake puretaan tien varressa kasoihin tai yleisimmin vaihtolavoihin. Palstahaketuksen etuja ja toisaalta haittoja ovat mm (Hakkila ja Fredriksson 1996):

- + Erillistä metsäkuljetusta ja välivarastointia ei tarvita hakettavalle materiaalille.
- + Tienvarsitilan tarve on pieni, koska hakkuutähteitä ei varastoida tien varressa.
- + Haketus ja autokuljetus eivät välttämättä muodosta kuumaa ketjua.
- Haketuskustannukset ovat suuremmat kuin välivarastohaketuksessa, koska hake kuljetetaan tienvarteen palstahakkurin kuormatilassa.
- Maapohjan on oltava tasainen ja kantava sekä kuljetusmatkan tienvarteen lyhyt.
- Tyhjien konttien siirtely palstalta toiselle aiheuttaa lisäkustannuksia.

Aiemmin yksi este palstahaketuksen yleistymiselle on ollut sopivien palstahakkurien puute. Hakeharvesteri Chipset 536 C:n käytöstä polttohakeen tuotannossa on saatu lupaavia tuloksia (Brunberg ja Persson 1993, Vesisenaho 1994, Rieppo ja Poikela 1995, Thor 1996). Nämä tutkimukset keskittyvät ensiharvennuskohteisiin ja niissä ei ole tutkittu haketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen muodostamaa toimitusketjua. Seurantatutkimusten mukaan hake-

harvesteri toimii pääasiassa päätehakuualoilla hakkuutähdehakeen korjuussa (Laurila ja Vesisenaho 1997). Chipset-hakeharvesteriin perustuvan polttohakeen tuotanto- ja kuljetusketjun teknistä ja taloudellista toimivuutta keskusomalaisissa puunkorjuuololoissa on tutkittu Bioenergian tutkimusohjelman projektissa Y107 (Sten 1995). Palstahaketuksen hankintaketjun osina olivat hakeharvesteri ja vaihtokontti-hakeauto. Tutkimuksessa havaittiin, että hakeharvesterin tuottavuus ei riitä lyhyillä kuljetusmatkoilla täyttämään kaukokuljetuksen kapasiteettia. Kaukokuljetuksessa voitaisiin käyttää myös täys- tai puoliperävaunullista hakeautoa, mikä kuitenkin edellyttäisi teknisiä muutoksia hakeharvesterin purkujärjestelmään. Hakkeen lisäksi hakeautolla voidaan ajaa myös muuta materiaalia.

Tutkimuksen tavoitteena oli mallintaa palstahaketuksen ja hakkeen kaukokuljetuksen muodostama toimitusketju sekä etsiä taloudellisin hakkeen kuljetustapa eri kuljetusmatkoilla sekä etsiä keinoja tasapainottaa palstahaketuksen ja kaukokuljetuksen tuottavuuksia. Tutkimus rajattiin kuusivaltaisten päätehakuualojen hakkuutähdehakeen korjuuseen. Menetelmällisesti tutkittiin paikkatietojärjestelmän ja diskreetin simulointimallin yhdistämistä.

2 Palstahaketuksen ja kaukokuljetuksen simulointi

2.1 Simuloinnin perusteet

Simuloinnilla tarkoitetaan erilaisten reaalimaailman prosessien jäljittelyä. Jäljiteltävää prosessia kutsutaan systeemiksi. Jotta reaalimaailman systeemiä voidaan tutkia simuloinnin keinoin on systeemin toiminnasta tehtävä oletuksia. Nämä matemaattisiksi tai loogisiksi suhteiksi muutetut oletukset muodostavat mallin, jonka avulla pyritään ymmärtämään, miten vastaava reaalimaailman systeemi käyttäytyy (Law ja Kelton 1982).

Simuloinnilla saavutetaan useita etuja analyytisiin operaatiotutkimuksen menetelmiin verrattuna, minkä takia simulointia käytetään laajasti. Monia reaalimaailman systeemejä, joissa on satunnaisvai-

telua, ei voida kuvata sellaisilla matemaattisilla malleilla, jotka olisivat analyttisesti ratkaistavissa. Tällöin simulointi on usein ainoa tapa tutkia näitä systeemejä. Simulointi mahdollistaa olemassa olevan systeemin suorituksen arvioimisen haluttujen lähtöoletusten vallitessa. Simuloitaessa voidaan myös paremmin kontrolloida koetilanteita kuin jos koe tehtäisiin reaaliaikaisen systeemin avulla. Simulointi mahdollistaa vastaamisen ”mitä-jos?” -kysymyksiin ja systeemin toiminnan tarkkailun erilaisissa aikaskaaloissa, nopeutettuna tai hidastettuna. (Law ja Kelton 1982, Banks ja Carson 1984).

Simulointimallin tekeminen on usein kallista ja aikaa vievää ja laadittu malli ei ole välttämättä yleisissä muissa vastaaviin tilanteisiin (Render ja Stair 1992). Jokainen satunnaisuutta sisältävän mallin simulointiajo tuottaa estimaatin mallin todellisesta luonteesta annetuilla lähtötiedoilla. Tämän takia mallilla on suoritettava useita riippumattomia ajoja tuloksen tarkkuuden parantamiseksi. Keskeinen tekijä on laaditun simulointimallin oikeellisuuden varmistaminen, sillä runsas simuloitujen aineiston määrä synnyttää helposti liian suurta luottamusta malliin, vaikka saatu informaatio olisi vähäistä. Simulointimallia ei tulisi käyttää ensi sijassa toimintojen optimointiin vaan eri vaihtoehtojen keskinäiseen vertailuun. (Law ja Kelton 1982).

2.2 Mallin yleisrakenne

Simulointimallin rakentaminen jakautui kahteen osaan: simulointiajoissa lähtötietoina käytettyjen leimikoiden muodostamiseen paikkatietojärjestelmään perustuen ja varsinaisen simulointimallin rakentamiseen. Lähtötietoina käytettävien leimikoiden muodostaminen on kuvattu luvussa 3.3. Leimikoiden tiedot syötettiin simulointimallille satunnaislukujakaumina, joiden tunnusluvut (puusto, metsäkuljetusmatka, pinta-ala) estimoitettiin maastoaineiston perusteella. Kunkin leimikon leimikkotiedot arvottiin jakaumista ennen leimikon korjuun aloittamista ja siirtomatka arvottiin seuraavalle leimikolle korjuun päättymisen jälkeen. Näin leimikoiden korjuujärjestys oli satunnainen.

Koneiden välisten vuorovaikutusten ja leimikkojen ominaisuuksien vaikutusten selvittämiseksi rakennettiin WITNESS-ohjelmistolla (Witness 1996)

simulointimalli. Simulointimallin rakentamiseksi nimettiin ensiksi ne reaaliaikaisen oliot, jotka mallissa on oltava mukana. Mallin osia ovat hakettava leimikko, hakeharvesteri, välivarasto, haketta kuljettava auto, tiet leimikoiden sekä hakkeen käyttöpaikan välillä ja lämpölaite, jonne hake toimitetaan.

Yleiskuva simulointiprojektin osien välisistä suhteista on kuvassa 1. Varsinainen simulointimalli saa syötteenä tiedot leimikoiden ja koneiden ominaisuuksista. Näitä syöteparametrejä voidaan muuttaa, kun mallia käytetään kokeisiin. Hakeharvesterin ja haketta kuljettavien autojen toiminta on mallitettu sääntöinä WITNESS-ohjelmiston oliokeskeistä lähestymistapaa hyödyntäen.

Simulointimalliin mukaan otetut kohteet näkyvät mallin käyttäjälle ohjelmiston graafisen käyttöliittymän kautta erilaisina ikoneina. Hakeharvesteria, kuorma-autoa ja teitä esittävät niille määritellyt ikonit. Mallissa olevien muuttujien tilaa voidaan seurata niiden ruudulla näkyvän tulostuksen avulla. Kun mallia käytetään kokeisiin, ohjelma suoritetaan ilman animaatiota ajon nopeuttamiseksi.

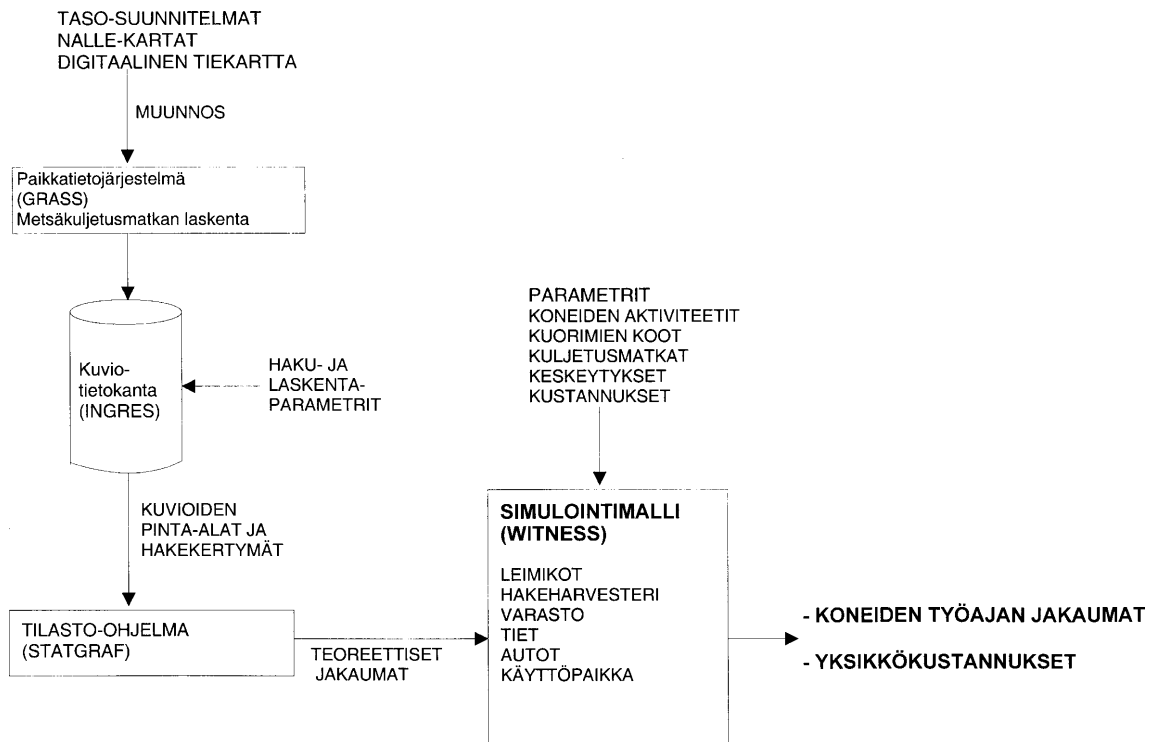
Simulointimalleja laadittiin neljä. Kullekin tutkittulle koneketjulle laadittiin oma mallinsa, koska haketta kuljettavat autot toimivat niissä eri tavoin. Simuloitujen ketjut olivat

- hakeharvesteri – täysperävaunullinen hakeauto
- hakeharvesteri – vaihtokonttiauto
- hakeharvesteri – puoliperävaunullinen hakeauto
- hakeharvesteri – puoliperävaunullinen hakeauto;
- hakkeen lisäksi auto ajaa myös turvetta

2.3 Koneiden toiminta simulointimallissa

2.3.1 Hakeharvesteri

Hakeharvesteri aloittaa toimintansa ensimmäiseltä leimikolta. Harvesteri ajaa palstalle ja aloittaa hakettavan materiaalin käsittelyn. Kuorman täytyttyä tai hakettavan materiaalin loputtua hakeharvesteri ajaa välivarastolle, jossa kuorma tyhjenetään, mikäli varastolla olevissa autoissa/konteissa/perävaunuissa on tilaa. Muutoin odotetaan tilan vapautumista. Mikäli hakettavaa materiaalia on leimikossa, palataan takaisin palstalle, muutoin siirrytään uudelle kohteelle.



Kuva 1. Paikkatietojärjestelmän ja simulointimallin toiminta.

2.3.2 Hakeautot

Vaihtolava-auto siirtyy simuloinnin alussa varikolta ensimmäiselle työmaalle ja jättää sinne kyydissä olevat kontit. Työmaalla on lähtötilanteessa kolme tyhjää konttia, joiden tilavuus on yhteensä 110 m³. Auton tultua varastolle aloitetaan kuormaus, kun kontit ovat täynnä. Tämän jälkeen auto ajaa lämpölaitokselle, purkaa kuorman ja palaa taas varastolle.

Täysperävaunullinen hakeauto aloittaa simulointimallissa ajon varikolta, josta se siirtyy ensimmäiselle työmaalle. Työmaalla on lähtötilanteessa yksi tyhjä *täysperävaunu*, jonka tilavuus on 74 m³. Kun perävaunu on täysi, vaihdetaan se tyhjiin vaunuun ja hakeharvesteri kuormaa vetoauton kuormatilan (36 m³). Kuorman täytyttyä tai kuormattavan materiaalin loputtua kohteelta auto siirtyy lämpölaitokselle ja purkaa kuorman. Tämän jälkeen auto palaa kohteelle, jossa hakeharvesteri työskentelee ja aloittaa kuormauksen uudestaan.

Puoliperävaunullisen hakeauton malli toimii samalla periaatteella kuin täysperävaunullisenkin.

Puoliperävaunun tilavuus on 110 m³. Perävaunu vaihdetaan tyhjiin vaunuun, kun se on täynnä. Toisin kuin täysperävaunullinen auto, puoliperävaunu-auto lähtee viemään kuormaa tehtaalle heti vaihdon jälkeen, sillä vetoautossa ei ole erillistä kuormatilaa.

Neljännessä vaihtoehdossa *puoliperävaunullinen auto ajaa myös turvetta* terminaalista, joka sijaitsee 40 km etäisyydellä käyttöpaikalta. Tällöin käyttöpaikalla kuorman purkamisen jälkeen päätetään, lähteekö auto ajamaan haketta vai turvetta. Auto lähtee ajamaan turvetta, jos puoliperävaunun täytymisaika ylittää 24 minuutilla yhden turvekuorman ajamiseen kuluvan ajan ja tienvarsivarastolle paluajan summan.

Leimikon vaihto tapahtuu kaikissa malleissa samalla periaatteella. Kun viimeinen kuorma on ajettu, viedään tyhjä perävaunu tai tyhjät kontit seuraavalle kohteelle ja haetaan kuormattu perävaunu tai kontit edelliseltä kohteelta ja viedään ne lämpölaitokselle. Tämän jälkeen ajoa jatketaan uudelta leimikolta.

2.4 Simulointimallin rakentaminen ja testaus

Simulointimallit rakennettiin aloittamalla hakeharvesterin toiminnan mallintamisesta. Hakeharvesteria kuvaavaa simulointimallia ajettiin aika-askel kerrallaan ja samalla seurattiin graafisen animaation avulla hakeharvesterin liikkumista mallissa. Hakeharvesterin työvaiheaikoihin ja kuormaukseen liittyvien muuttujien tilaa seurattiin tulostamalla niiden arvot kuvaruudulle. Arvojen oikeellisuus ja ristiriidattomuus tarkistettiin manuaalisesti laskemalla ja vertaamalla niitä aikatutkimuksissa saatuihin tuloksiin. Tämän jälkeen mallia ajettiin useita kertoja eri lähtöarvoilla mallin toiminnan jatkumisen varmistamiseksi. Seuraavaksi malliin lisättiin hakeauton toiminta ilman koneiden välistä vuorovaikutusta. Hakeauton toimintaa ja siihen liittyvien muuttujien tilaa seurattiin graafisen animaation avulla ja verrattiin aikatutkimuksissa saatuihin arvoihin. Lopuksi molemmat osa-alueet kytkettiin yhteen ja mallin toimintaa seurattiin edellä mainitulla tavalla. Kaikkien tehtyjen simulointiajojen yhteydessä tarkkailtiin mallin antamien tulosten loogisuutta.

3 Simuloinnin lähtötiedot

3.1 Hakeharvesteri

Hakeharvesterin ajankäyttö jaettiin mallissa kolmeen osaan: varsinaiseen haketukseen, siirtymiseen palstan ja varaston välillä sekä purkamisen ajanmenekkiin. Haketettavana materiaalina oli päte-hakkuukuusikoiden hakkuutähde. Hakkuutähteen haketuksessa käytettiin Riepon ja Poikelan (1994) esittämää ajanmenekkiä 188 cmin/i-m^3 , joka vastaa $13,72 \text{ m}^3$ prosessointituottavuutta tehotunnissa.

Riepon ja Poikelan (1994) esittämien laskennallisten ajanmenekkien perusteella siirtymiselle muodostettiin lineaariset regressioyhtälöt, joissa selitettävänä muuttujana on hakeharvesterin ajonopeus ja selittävänä muuttujana ajomatkan pituus.

Hakeharvesterin ajonopeus laskettiin kaavalla

$$\text{ajonopeus} = 1,93 + 0,0063 \times \text{matka},$$

jossa ajonopeus on kilometreinä tunnissa ja matka metreinä.

Tyhjennyksen keskimääräisenä ajanmenekkinä käytettiin 165 cmin/kuorma (Rieppo ja Poikela 1994).

Hakeharvesterin siirtoon leimikolta toiselle liittyvien kuormauksen (siirron valmistelu ja ajo lavetille) ja purun (ajo lavetilta ja leimikon aloitus) oletettiin molempien vievän 32 min/siirto (Asikainen 1995). Siirron ajanmenekissä siirtonopeutena käytettiin kuormatun hakeauton ajonopeutta.

Oleellisena koneiden suorituskykyyn vaikuttavana tekijänä ovat erilaiset satunnaiset keskeytykset. Vesisenahon (1994) tutkimuksessa hakeharvesterin tekniseksi käyttöasteeksi saatiin 80% ja keskeytysten osuudeksi käyttöajasta $6\text{--}13 \%$. Simulointimallia laadittaessa otettiin lähtökohdaksi 80% :n tekninen käyttöaste ja keskeytysten 10% :n osuus käyttöajasta, jolloin keskeytyksiä on 28% kokonaisajasta. Tällöin keskeytysten keskimääräiseksi kestoksi saadaan 31 minuuttia ja keskeytysten väliksi $77,4 \text{ minuuttia}$, joiden molempien oletettiin noudattavan eksponenttijakaumaa.

Hakeharvesterin kustannukset jaettiin varsinaisiin käyttötuntikustannuksiin ja siirtokustannuksiin. Käyttötuntikustannuksena pidettiin Riepon ja Poikelan (1994) esittämää 372 mk/tunti . Siirtokustannukset hinnoiteltiin siirtoon käytetyn ajan perusteella. Siirtotyön kustannuksena pidettiin 250 mk/tunti (Asikainen 1995). Molemmat hinnat on ilmoitettu verottomina.

3.2 Hakeautot

Tutkimuksessa mallitetut hakeautot on esitetty kuvassa 2. Hakeautojen ajankäytön keskeiset osat ovat ajo tyhjänä ja kuormattuna sekä kuormaus- ja purkuajat. *Hakkeen ajossa* auton ajonopeus kuormattuna lasketaan seuraavalla kaavalla (Kukko ym. 1990):

$$\text{ajonopeus} = -0,44591 + 31,69 \times \log(\text{matka}),$$

missä ajonopeus on kilometriä tunnissa ja matka kilometreinä.

Vastaavasti ajonopeus tyhjänä lasketaan kaavalla (Kukko ym. 1990):

ajonopeus = $5,7917 + 30,630 \times \log(\text{matka})$,

missä ajonopeus on kilometriä tunnissa ja matka kilometreinä.

Turpeen kuormaus kestää 26 minuuttia ja purkamisen käyttöpaikalla 30 minuuttia. Auton nopeus turpeen ajossa on kuormattuna 70 km/h ja tyhjänä 75 km/h. Turpeen ajossa ajonopeudet ovat korkeammat kuin hakkeen ajossa, sillä turveterminaalin ja lämpölaitoksen välinen tie on päällystetty.

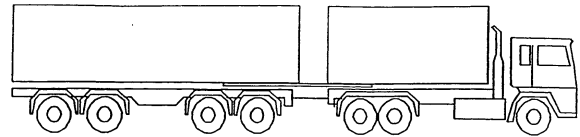
Autojen kuormauksen ajanmenekki riippuu auton tyypistä. Vaihtokonttiautolla ajanmenekki muodostuu epäsuorasta kuormausajasta, joka sisältää perävaunun irrotuksen, kuormauksen valmistelun, ajamisen kuormausalueelle ja perävaunun kiinnityksen. Varsinainen suora kuormausaika sisältää kolmen kontin kyytiin oton. Vaihtolava-auton kuormauksen ajanmenekkinä pidettiin epäsuoran kuormausajan osalta 20 min ja suoran kuormausajan osalta 6,5 min (Kuitto ja Rajala 1982).

Tavanomaisten perävaunullisten hakeautojen kohdalla epäsuorana kuormausaikana käytettiin 12 minuuttia/kuormaus (Korhonen ja Oijala 1991). Suora kuormausaika määräytyy hakeharvesterin tuottavuudesta kyseisellä kohteella.

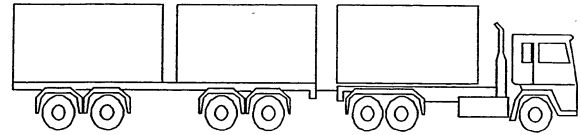
Autojen kuormien purkamisen ajanmenekiksi hakkeen käyttöpaikalla oletettiin auton tyypistä riippumatta 30 min/kuorma (Nousiainen ym. 1993).

Alveen (1988) mukaan puutavara-autojen kaikkien keskeytysten määrä on 31 min/kuorma, mikä on noin 10 %:ia kuljetusajasta. Empiiristen tulosten puuttuessa käytettiin keskeytysten välisenä aikana 225 min ja keskimääräisenä kestona 25 min, molempien ollessa eksponentiaalisesti jakautuneita, jolloin keskeytysten osuudeksi saadaan edellä mainittu 10 %.

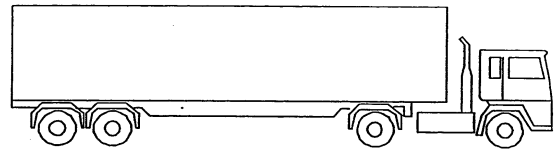
Hakeautojen kustannukset laskettiin Oijalan ja Rajamäen (1992, päivitetty 1994) esittämällä kustannuslaskentamallilla. Kaluston hankintahinta selvitettiin yhteistyössä valmistajien kanssa (Sisu auto Oy, Antti Ranta Oy). Erityyppisten hakeautojen käyttötuntikustannukset muodostuivat niin samantasoiksi, että päädyttiin käyttämään kaikille samaa käyttötuntikustannusta, 335 mk/h. Lisäksi systeemeissä olevien ylimääräisten vaihtokonttien (3 kpl), puoliperävaunun ja täysperävaunun käyttötuntikustannukseksi saatiin 35 mk/h. Vastaavasti odotuskus-



Täysperävaunullinen hakeauto



Vaihtokontti-hakeauto



Puoliperävaunullinen hakeauto

Kuva 2. Simuloidut hakeautot.

tannus kaikilla autotyypeillä oli 209 mk/käyttötunti. Hinnat on ilmoitettu verottomina.

3.3 Työmaatiiedot

Leimikoiden osalta lähtötietoina käytettiin Metsäkeskuksen keräämää TASO-suunnitelmien aineistoa Juvan alueelta. Aineisto käsitti noin 11 600 metsikkökuviota viideltä suunnitelma-alueelta. Metsäkuljetusmatkan laskennassa käytettiin maanmittaushallituksen tietotokannan aineistoa alueen tietöstä (Autotiet 1a–autotiet 3b).

Metsäsuunnitelmien kuviokartat siirrettiin GRASS-ohjelmistolla rakennettuun paikkatietokantaan (Grass ... 1993). Alunperin vektorimuodossa olevat kuvat rasteroitiin 20×20 metrin pikselikoolla. Kuviokartan ja tieverkoston perusteella laskettiin kullekin metsikkökuviolle keskimääräinen etäisyys lähimpään tiehen (vrt. Pasanen ym. 1997).

TASO-suunnitelmien kuviotiedot siirrettiin INGRES-sovelluskehittimellä rakennettuun tietokantaan (INGRES/SQL ... 1991). Tietokannan tauluihin tal-

Taulukko 1. Simuloinnissa käytettyjen pinta-alojen, metsäkuljetusmatkojen ja hakkeen hehtaarikertymien jakaumat parametreineen päätehakkuukuusikossa.

Muuttuja	Jakauma	Parametrit	X ²	df	p	n
Pinta-ala, ha	lognormal	x = 1,5458 sd = 1,3155	31,6862	9	2,25 × 10 ⁻⁴	839
mk-matka, m	eksponentti	x = 647,585	11,8715	14	0,6166	591
Kertymä, m ³ /ha	weibull	a = 3,3761 b = 127,81	39,35	14	3,02 × 10 ⁻⁴	689

letettiin osa kuviotiedoista, laskettu metsäkuljetusmatka ja arvio energiapuun kertymästä kuviolla. Kuvion hehtaarikohtainen hakkuutähdekertymä laskettiin prosentteina ilmoitetusta ainespuun hakkuukertymästä. Hakkuutähteen määrän laskennassa hakkuutähteen kertymään otettiin mukaan latvusmassan elävät oksat ja puolet neulasista kuitenkin siten, että lehtipuiden lehtiä ei laskettu mukaan kertymiin. Lähteenä käytettiin Hakkilan (1991) taulukoita latvuksen kuivamassasta kiloina rungon kuorellista kuutiometriä kohden leimikkoluokittain Etelä-Suomessa. Hakkuutähdekerroin eri puulajeille laskettiin jakamalla taulukosta saadut latvusmassat kuivatuoretiheyksillä (männällä 385 kg/m³, kuusella 400 kg/m³ ja lehtipuilla 500 kg/m³) (vrt. Pasanen 1994, Pasanen ym. 1997). Puulajeittaisiksi hakkuutähteen kertymäprosentteiksi eri hakkuutavoilla muodostui:

$$\begin{aligned} \text{ht\%}_{\text{mä}} (\text{päätehakkuu}) &= 65 \text{ kg/m}^3 / 385 \text{ kg/m}^3 = 0,168 \\ \text{ht\%}_{\text{ku}} (\text{päätehakkuu}) &= 128,1 \text{ kg/m}^3 / 400 \text{ kg/m}^3 = 0,32 \\ \text{ht\%}_{\text{lepu}} (\text{päätehakkuu}) &= 81,5 \text{ kg/m}^3 / 500 \text{ kg/m}^3 = 0,163 \end{aligned}$$

Kuviolta kertyvän hakkuutähteen hehtaarikohtainen kokonaismäärä laskettiin kaavalla:

$$V_{\text{tähd}} = V_{\text{hakkuu}} \times (\text{rhp} + \text{taltp} \times (\text{ht\%}_{\text{mä}} \times \text{mäos} + \text{ht\%}_{\text{ku}} \times \text{kuos} + \text{ht\%}_{\text{lepu}} \times \text{leos}))$$

missä,

$$\begin{aligned} V_{\text{tähd}} &= \text{hakkuutähteen hehtaarikertymä kuviolla} \\ V_{\text{hakkuu}} &= \text{hehtaarikohtainen hakkuukertymä kuviolla} \\ \text{rhp} &= \text{runkohukkapuun osuus, päätehakkuussa 0,01} \\ \text{taltp} &= \text{talteensaantoprosentti, päätehakkuussa 65 \%} \\ \text{ht\%}_{\text{mä}} &= \text{männyn hakkuutähdeprosentti kuviolla} \\ \text{ht\%}_{\text{ku}} &= \text{kuusen hakkuutähdeprosentti kuviolla} \\ \text{ht\%}_{\text{lepu}} &= \text{lehtipuun hakkuutähdeprosentti kuviolla} \end{aligned}$$

mäos = männyn % osuus puustosta
kuos = kuusen % osuus puustosta
leos = lehtipuiden % osuus puustosta.

Tietokantaan talletetut pinta-alat, metsäkuljetusmatkat ja hakettavan materiaalin hehtaarikertymät poimittiin tiedostoihin. Poimituihin empiirisiin jakaumiin sovitettiin tilasto-ohjelmistolla (STATGRAF) teoreettinen jakauma. Saadut jakaumat parametreineen on esitetty taulukossa 1.

Simuloinnin kuluessa uudelle kohteelle haettiin metsäkuljetusmatka arvotun satunnaisluvun perusteella vastaavasta jakaumasta. Kohteelta hakettava määrä saatiin kertomalla kohteen pinta-alajakau-
masta satunnaisluvun avulla poimittu arvo kohteen kertymäjakaumasta satunnaisluvun avulla saadulla arvolla.

3.4 Simulointikokeet

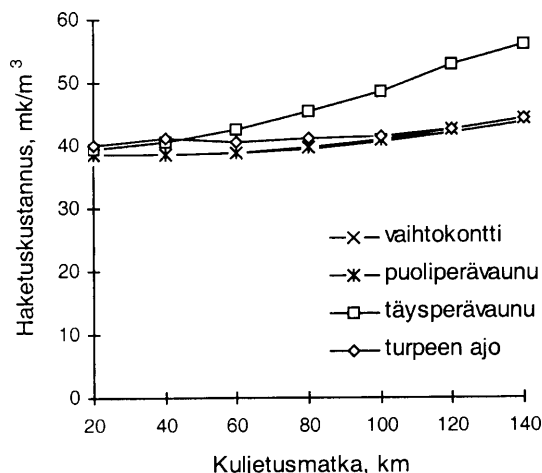
Kutakin korjuuketjua tutkittiin kuljetusmatkoilla 20, 40, ..., 140 kilometriä. Simulointikoe koostui 7 toistosta, eli tietyllä kuljetusmatkalla mallia ajettiin 7 kertaa samoilla lähtöarvoilla ja ainoastaan satunnaislukuvirtoja muutettiin. Yksi toisto kesti 424 tuntia, mikä vastaa noin yhden kuukauden työskentelyä kahdessa vuorossa. Ennen aineiston keruun aloittamista mallia ajettiin 24 tuntia. Herkkyysanalyysissä tutkittiin haketuottavuuden ja hakeharvesterin kuorman koon vaikututusta korjuukustannuksiin. Kokeissa kuljetusmatka asetettiin 40 kilometriksi.

Aineistoa kerättiin ns. restart-menetelmällä (Law ja Kelton 1982), eli yksi toisto muodostui 400 tunnin ajon tuloksista, minkä jälkeen malli nollattiin ja aloitettiin uusi toisto. Tulokset on ilmoitettu 7 toiston keskiarvoina.

4 Tulokset

Kuljetusmatkan pidentyminen vaikuttaa voimakkaimmin haketuskustannuksiin systeemissä, jossa hake kuljetetaan käyttöpaikalle täysperävaunuautolla (kuva 3). Sen sijaan systeemeissä, joissa kaukokuljetus perustuu joko vaihtokontteihin tai puoliperävaunulliseen rekkaan haketuskustannus on lähes vakio aina 60 kilometrin matkalle saakka. Tämä johtuu siitä, että kaukokuljetus ei rajoita hakkurin toimintaa lyhyemmällä matkoilla. Täysperävaunullisen systeemin korkeampi haketuskustannus on seurausta pienemmästä puskurivarastosta haketuksen ja kaukokuljetuksen välillä: Puskurivarasto täyttyy, ennen kuin auto ehtii takaisin. Lisäksi vetoauton lava on hakettava täyteen ennen liikkeellelähtöä, mikä vie aikaa lähes kaksi tuntia. Systeemi, jossa puoliperävaunullinen rekka ajaa lisäksi turvetta, aiheuttaa eniten odotusaikojaa haketukselle lyhyillä kuljetusmatkoilla. Kun kuljetusmatka pitenee, turvetta ei ehditä ajaa lainkaan, jolloin kustannukset lähenevät puoliperävaunullisen systeemin kustannuksia.

Kaukokuljetuskustannusten osalta edullisimmaksi järjestelmäksi osoittautui vaihtoehto, jossa osan työajastaan hakeauto ajaa turvetta (kuva 4). Tämä näkyy erityisesti lyhyillä kuljetusmatkoilla, kun hakeauton tuottavuus on selvästi korkeampi kuin hakeharvesterin tuottavuus. Turpeen ajo tasaa osittain

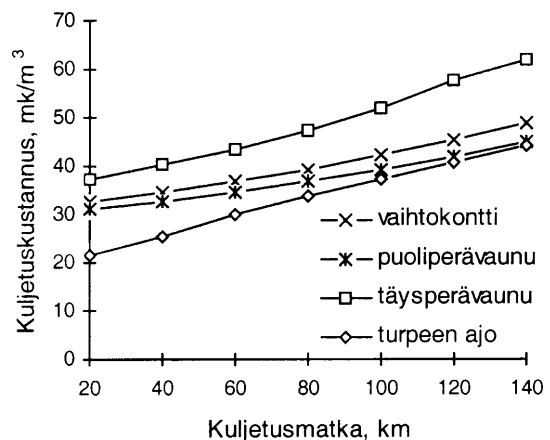


Kuva 3. Haketuskustannukset ilman odotuskustannuksia.

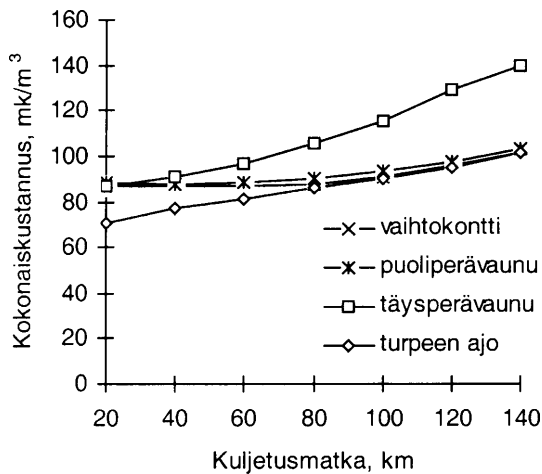
koneiden kapasiteetit. Kuljetusmatkan pidentessä hakeauto ajaa turvekuormia vain harvoin ja kaukokuljetuskustannus lähestyy pelkän hakkeen ajon kustannusta. Täysperävaunullinen auto joutuu odottamaan varastolla vetoauton kuormauksen ajan, mikä aiheuttaa korkeammat kuljetuskustannukset, vaikka kuorman koko onkin sama kuin muissa vaihtoehtoisissa.

Kokonaiskustannukset ovat kuvassa 5. Kokonaiskustannukset sisältävät haketus-, kaukokuljetus- ja odotuskustannusten lisäksi hakeharvesterin ja konttien/tyhjän perävaunun siirtokustannuksia n. 1,5 mk/m³. Alle sadan kilometrin kuljetusmatkoilla hakeauton kannattaa käyttää osa ajastaan turpeen ajoon. Vasta tätä pitemmällä kuljetusmatkoilla hakeharvesterin ja hakeauton kapasiteetit alkavat vastata toisiaan. Puoliperävaunuun tai vaihtokontteihin perustuvilla systeemeillä ei ole juurikaan eroa kustannuksiltaan, mutta täysperävaunuun perustuva systeemi on kallein.

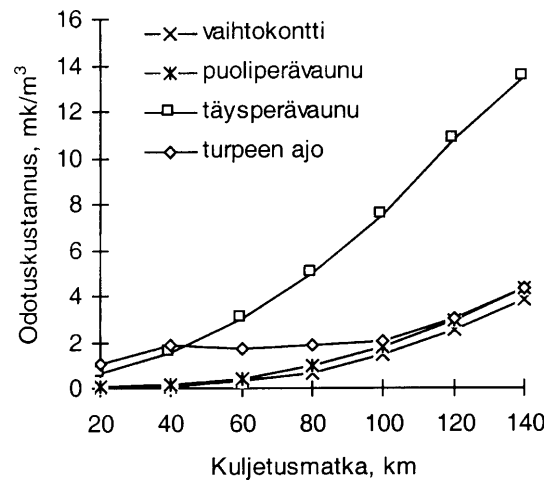
Hakeharvesterin odotuskustannukset ovat kuvassa 6 ja hakeautojen kuvassa 7. Hakeharvesterin odotuskustannus nousee, kun kuljetusmatka pitenee autojen ajaessa pelkästään haketta. Jos hakeauto ajaa turvetta, odotuskustannukset nousevat ensin ja laskevat, kun auto ei enää lähde turpeen ajoon. Kuljetusmatkan edelleen pidentessä hakeharvesterin odotuskustannus lähenee pelkän hakkeen ajon tilannetta. Vastaavasti pelkkää haketta ajavien autojen odo-



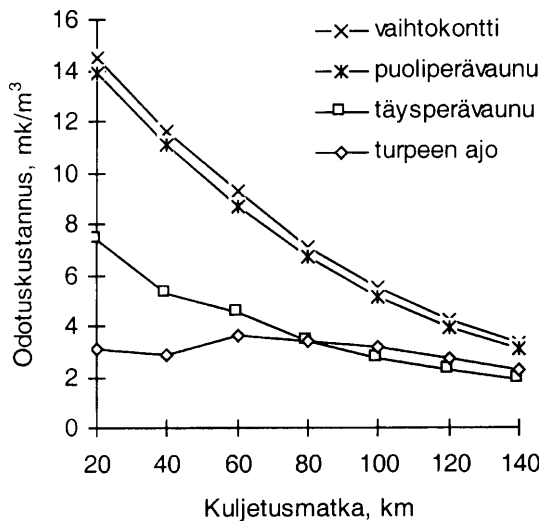
Kuva 4. Kaukokuljetuskustannukset ilman odotuskustannuksia.



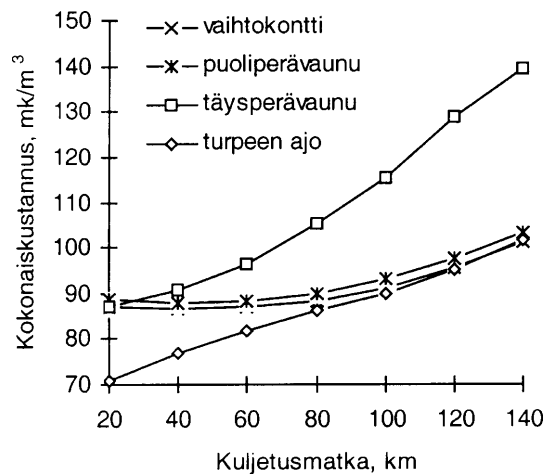
Kuva 5. Kokonaiskustannukset.



Kuva 6. Hakeharvesterin odotuskustannukset.



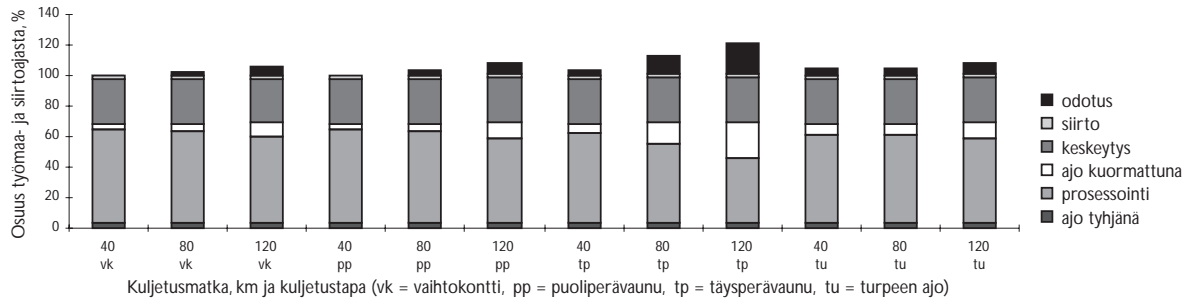
Kuva 7. Hakeautojen odotuskustannukset.



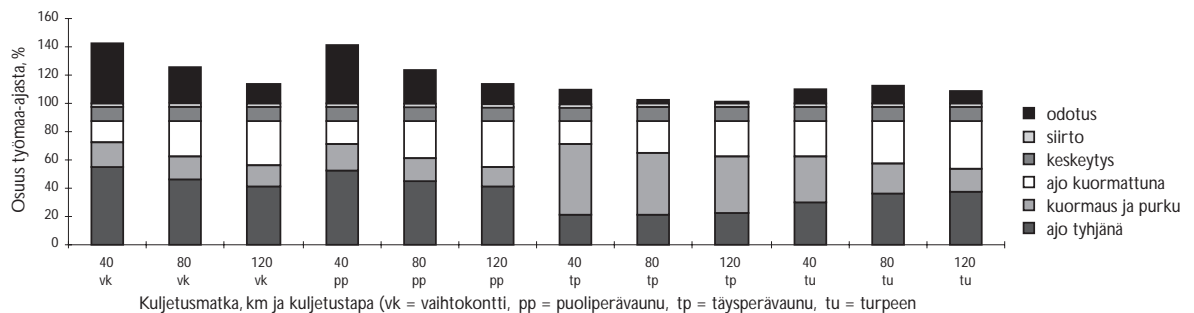
Kuva 8. Systeemin odotuskustannukset.

tuskustannus laskee kuljetusmatkan kasvaessa. Jos ajettavana on myös turvetta, autolle ei tule koskaan pitkiä odotusaikoja ja odotuskustannus pysyy lähes vakiona. Koko systeemin odotuskustannukset ovat kuvassa 8. Systeemeissä, joissa autot kuljettavat vain haketta, on löydettävissä odotuskustannusten minimipiste. Turpeen ajon osalta tilanne ei ole näin yksiselitteinen, vaan odotuskustannukset vaihtelevat ensin, mutta pitkällä kuljetusmatkoilla ne alkavat kohota hakeharvesterin odotuksen vuoksi.

Hakeharvesterin ja hakeautojen ajankäytön jakaumat ovat kuvissa 9 ja 10. Kuvissa odotusaika on tulostettu 100 % ylimenevänä osana. Hakeharvesteri odottaa, kun se ei pääse purkamaan kuormaansa välivarastolle eli sen ollessa kuormattuna-ajossa. Vastaavasti hakeauto odottaa, kun se ei pääse kuormaamaan eli sen ollessa tyhjänäajossa. Kaukokuljetusmatkan kasvaessa hakeharvesterin odotusajan osuus kasvaa ja vastaavasti hakeautojen odotuksen osuus pienenee.



Kuva 9. Hakeharvesterin ajankäytön jakaumat.



Kuva 10. Hakeautojen ajankäytön jakaumat.

Herkkyyksianalyyseissä tarkasteltiin hakeharvesterin haketuottavuuden ja hakesäiliön koon vaikutuksia korjuukustannuksiin kaukokuljetusmatkan ollessa 40 km (kuvat 11 ja 12). Säiliön koko ei vaikuta juurikaan korjuukustannuksiin, mutta haketuottavuuden nosto alentaa korjuukustannuksia selvästi. Kuvissa haketus- ja kaukokuljetuskustannuksiin on sisällytetty myös odotus- ja siirtokustannukset.

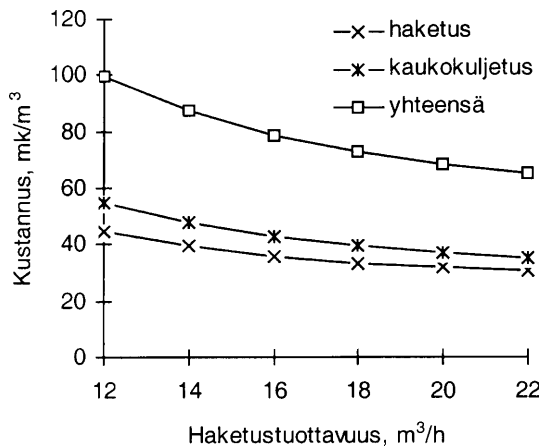
5 Tulosten tarkastelu

Hakeharvesteriin perustuva toimitusketju edellyttää hakeautolta muuta ajoa alle 60 km kuljetusmatkoilla, mikä oli ennakoitavissa tuottavuustutkimusten perusteella (Vesisenaho 1994, Rieppo ja Poikela 1994). Niissäkin tilanteissa, joissa palstahaketuksen tuotokset ovat lähellä toisiaan ei välttyä odotuskustannuksilta, sillä satunnaiset konerikot ja keskeytykset ja muut satunnaistekijät, kuten metsäkul-

jetusmatkan vaihtelu aiheuttavat aina tietyn määrän aikaeroa koneiden välille.

Toiminnan kannalta olennainen tekijä on välivarastopuskurin koko, mikäli haketuustoiminta on jatkuva. Kaukokuljetuksen kannalta edullisimmaksi osoittautui järjestelmä, jossa vetoautossa ei ole kuormatilaa, joka on täytettävä auton ollessa välivarastolla. Puoliperävaunu vaatii kuitenkin paremmat varastotilat kuin täysperävaunu ja sen maasto-ominaisuudet ovat heikommät, mikä rajoittanee sen käyttöä osalla kohteista. Sen vaikutusta kustannuksiin ei tässä tutkimuksessa selvitetty. Vaihtokontti-auton osalta välivarastovaatimukset ovat jokseenkin samat kuin täysperävaunuautollakin.

Nykyisellä purkulaitteistolla Chipset-hakeharvesteri ei voi purkaa kuormaansa suoraan vaihtoperävaunuun tai vetoauton kuormatilaan. Siksi nopeimmin sovellettavissa oleva systeemi on vaihtokonttien käyttöön perustuva järjestelmä, jossa hakeautolle järjestetään lisätyötä. Tässä esimerkissä hakeauto ajoi turvetta, mutta myös muut materiaalit



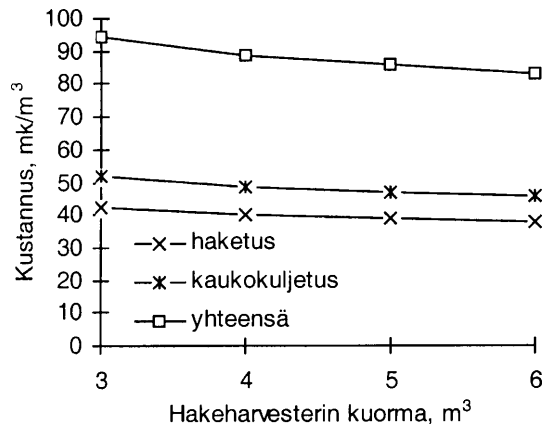
Kuva 11. Hakeharvesterin haketustuottavuuden vaikutus korjuukustannuksiin.

voivat tulla kyseeseen.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset ovat varsin samansuuntaisia verrattuna seurantatutkimustekniikalla tehdyn tutkimuksen tuloksiin (Laurila ja Vesisenaho 1997). Hakeharvesterin odotusten osuus työstä oli tässä tutkimuksessa vaihtokonttitekniikkaa sovellettaessa 75 km kuljetusmatkalla noin 1,5 % (Kuva 10), kun seurantatutkimuksessa vastaava luku oli 1,3 %. Vastaavasti hakeauton odotusajan osuus oli tässä tutkimuksessa 27 % ja seurantatutkimuksessa 33 %. On kuitenkin huomattava, että tutkimusten olosuhdetiedot poikkesivat toisistaan haketettavan materiaalin ja siirtomatkan osalta. Lisäksi seurantatutkimuksessa kaukokuljetukseen käytetty auto oli kuormatilaltaan vain 90 m³.

Tässä tutkimuksessa saadut tulokset pätevät vain nyt esitetyissä tilanteissa. Tasoltaan kustannukset vastaavat hyvin seurantatutkimuksessa saatuja kustannuslukuja (Ikäheimo ja Asikainen 1998). Kun verrataan odotusajat huomioonottavalla simulointimallilla saatuja tuloksia perinteisellä kustannuslaskennalla saatuihin tuloksiin havaitaan, että hyvin tasapainossa olevassa tilanteessa ne vastaavat toisiaan. Lyhyillä kuljetusmatkoilla sen sijaan odotusten aiheuttama kustannus otetaan simuloinnissa huomioon, mikä nostaa kustannuksia.

Mallia voidaan soveltaa erilaisiin päätöksentekotilanteisiin syöttötietoja sekä mallin parametrejä muuttamalla. Puoliperävaunu tai vaihtolavakalusto ovat selvästi edullisempia vaihtoehtoja hakkeen



Kuva 12. Hakeharvesterin kuorman koon vaikutus korjuukustannuksiin.

kaukokuljetuksessa palstahaketuksen yhteydessä täysperävaunukalustoon verrattuna. Puoliperävaunun käyttäminen rajoittaa kuitenkin heikompi maastokelpoisuus. Lisäksi hakeauton lisäyksen järjestäminen on välttämätöntä hakkeen toimitusketjun tasapainottamiseksi lyhyillä kuljetusmatkoilla.

Tässä tutkimuksessa yhdistettiin metsäsuunnitelmätiedoista saadut metsävaratiedot ja paikkatietojärjestelmällä lasketut sijainti- ja kuljetusmatkatiedot, joista korjuuseen sopivat kohteet poimittiin edelleen tietokannanhallintaohjelmalla. Poimitut leimikot ja niiden puuvara- sekä paikkatiedot vietiin edelleen tuotantolaitossimulointimalliin satunnaislukujakaumina, joiden parametrit estimoitiin empiirisestä aineistosta. Toinen vaihtoehto olisi ollut käyttää todellista, taulukkomuotoista aineistoa suoraan syöttötietoina. Paikkatietoaineiston suora käyttö edellyttää suurten taulukoiden selaamista ja hidastaa merkittävästi varsinaista simulointiosiota. Mikäli paikkatiedon suhteen halutaan tehdä herkkyysanalyysiä, on koko taulukkoaineistoa muokattava haluttuun suuntaan, mikä on varsin työlästä (Asikainen 1995). Jos taas paikkatieto kuvataan teoreettisina jakaumina, voidaan herkkyysanalyysiä tehdä jakaumien parametrejä muuttamalla varsin nopeasti. Tällöin herkkyysanalyysi voidaan tehdä suoraan simulointimallilla, eikä edeltäviin aineistonkäsittelyvaiheisiin ole välttämätöntä palata.

Kirjallisuus

- Alve, M. 1988. Puutavara-autojen ajankäyttö. Metsäteho. 20 s.
- Asikainen, A. 1995. Discrete-event simulation of mechanized wood-harvesting systems. Joensuun yliopisto, metsätieteellinen tiedekunta. Tiedonantoja 38. 86 s.
- Banks, J. & Carson, J.S. 1984. Discrete-event system simulation. Prentice-Hall Inc., Eaglewood Cliffs, New Jersey. 514 p.
- Brunberg, B. & Persson, J. 1993. Skogsbränsleuttag vid gallring – studier hos Södra skogsägarna oc Skaraborgs skosägare i samarbete med projekt Skogskraft. Skogforsk. Stencil 1993-05-18. 44(29) s.
- GRASS 4.1 programmer's manual. 1993. U.S. Army Construction Engineering Research Laboratory. 348 s.
- Hakkila, P. 1991. Hakuupestuman latvamassa. Folia Forestalia 773. 24 s.
- & Fredriksson, T. 1996. Metsämme bioenergian lähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 613. 92 s.
- , Nurmi, J. & Kalaja, H. 1998. Metsänuudistusalojen hakkuutähde energianlähteenä. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 684. 68 s.
- Ikäheimo, J. & Asikainen, A. 1998. Puupolttoaineen tuotantomenetelmien tuottavuus ja kustannukset. Bioenergian tutkimusohjelman projekti 136. Loppuraportti. 36 s.
- INGRES/SQL reference manual for UNIX and VMS operating systems. Release 6.4. 1991. Alameda, California, USA.
- Korhonen, E. & Oijala, T. 1991. Puutavara-auton kuormausmenetelmien vertailua. Metsätehon katsaus 6. 6 s.
- Kuitto, P.-J. & Rajala, P.S. 1982. Kokopuiden välivarastollahaketus ja metsähakkeen autokuljetus. Metsätehon tiedotus 372. 14 s.
- Kukko, T., Lahti, K. & Torpo, J. 1990. Puutavara-autotarpeen määrittäminen annetuissa olosuhteissa. Puunkorjuun ja kaukokuljetuksen harjoitustyö. Helsingin yliopisto, metsäteknologian laitos. 12 s.
- Laurila, P. & Vesisenaho, T. 1997. Chipset-hakeharvesterin demonstrointi. Bioenergian tutkimusohjelma, Vuosikirja 1996, Osa 1, Puupolttoaineiden tuotantotekniikka. s. 251–257. Jyväskylän Teknologiakeskus Oy.
- Law, A. & Kelton, W. 1982. Simulation modeling analysis. McGraw-Hill Book Company, New York. 400 s.
- Nousiainen, I., Imponen, V., Jaatinen, E. & Korpilahti, A. 1995. Puupolttoaineiden tuotantomenetelmien nykytekniikka, kustannukset ja kehittämismahdollisuudet. Bioenergian tutkimusohjelman julkaisuja 5. 95 s.
- Oijala, T. & Rajamäki, J. 1992. Metsäalan urakoinnin kustannuslaskentamallit. Käyttöohjeita. Metsätehon moniste. 23 s.
- Pasanen, K. 1994. Alueellisen energiapuuselivityksen menetelmä. Pilottihankkeen työraportti. Bioenergian tutkimusprojekti D105. 21 s.
- , Vesterlin, V., Keskimölo, A., Soimasuo, J. & Tokola, T. 1997. Alueellisten energiapuuvarojen analysointimenetelmä. Metsätieteen aikakauskirja – Folia Forestalia 1/1997: 25–35.
- Render, B. & Stair, R.M. 1992. Introduction to management science. Boston Allyn & Bacon. 680 s.
- Rieppo, K. & Poikela, A. 1994. Chipset-hakeharvesterin tuottavuus- ja kustannusanalyysi. Metsäteho. 23 s.
- Sten, K. 1995. Hakeharvesterin kehitys – Chipset. Bioenergian vuosikirja 1994, osa 1: Puupolttoaineiden tuotanto. s. 93–102.
- Thor, M. 1996. Chipset 536 C stickvägsgående flisare – tidsstudie och systemanalys. Skogforsk. Stencil 1996-10-02. 14(3) s.
- Vesisenaho, T. 1994. Chipset 536 C -hakeharvesterin käyttö polttihakkeen tuotannossa. Bioenergian tutkimusohjelma. Keski-Suomen metsäenergiaprojekti D 106. 29 s.
- Witness. 1996. Book 1: Introduction to Witness. Lanner Group. Redditch. UK. 117 s.

25 viitettä