METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 694, 1998

Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen

Matti Sirén

VANTAAN TUTKIMUSKESKUS

METLA

METSÄNTUTKIMUSLAITOKSEN TIEDONANTOJA 694, 1998 24.09.98

Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen

Matti Sirén

Esitetään Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen tiedekunnan luvalla tarkastettavaksi Metsätalon luentosalissa II, Unioninkatu 40 B, perjantaina syyskuun 18. päivänä 1998 klo 12.00.

VANTAAN TUTKIMUSKESKUS

METSÄNTUTKIMUSLAITOS
Kirjasto

Sirén, M. 1998. Hakkuukonetyö, sen korjuujälki ja puustovaurioiden ennustaminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 694. 179 s.
ISBN 951-40-1635-1, ISSN 0358-4283

Suomessa lähes 70 % harvennushakkuista tehdään koneellisesti. Harvennuksissa työpariksi on vakiintunut yksiotehakkuukone ja kuormatraktori. Koneellisten harvennusten korjuujälki on tutkimusten mukaan ollut keskimäärin hyväksyttävää, mutta tuloksille on ollut leimallista puustovaurioiden määrän suuri vaihtelu. Jälkikäteen tehdyillä inventoinneilla vaihtelun syitä ei ole aina pystytty selittämään luotettavasti.

Puustovaurioiden syntyä tapahtuma-aikaisesti seuraamalla etsittiin tietoa vaurioiden aiheuttajista ja syistä samoin kuin vaurioiden syntyherkkyyteen vaikuttavista tekijöistä. Yhdistämällä korjuujäljen, hakkuutyön ajanmenekin sekä työkoneen liikkeiden tutkimus saatiin kokonaisvaltainen kuva hakkuutyöstä. Jälkikäteen tehdyillä koealamittauksilla tutkittiin jäävän puuston ja poistuman määrää, laatua ja jakautumista eri etäisyyksillä urista sekä puustovaurioiden ja ajourien määrää.

Puustovaurioiden tutkiminen perustui pystypuihin osuneiden kosketusten ja niistä syntyneiden vaurioiden määrän ja laadun selvittämiseen. Tutkimusaineisto käsitti 8192 puuta. Yksittäisen puun käsittelyn työvaiheet muodostivat työsyklin. Pystypuihin kosketuksen aiheuttaneiden työsyklien osuus oli koko aineistossa keskimäärin 19,3 % kuljettajakohtaisten keskiarvojen vaihdellessa välillä 14,5 - 25,4 %. Kosketuspuista poistettiin saman tien hieman yli kolmannes. Pystyyn jääneistä kosketuspuista vaurioitui keskimäärin 28,2 %. Kesällä todennäköisyys vaurion synnylle kosketuksesta oli yli 1,5-kertainen muihin vuodenaikoihin verrattuna. Hakkuukonetyössä syntyneet vauriot olivat yleensä pieniä, pitkänomaisia pintavaurioita.

Jäävän puuston määrä vastasi ohjeita. Puuston määrä eri etäisyyksillä urista oli verraten tasainen, ja metsänkäsittely oli alaharvennusta. Keskimääräinen ajouraväli oli 19,8 m, uraleveys 4,8 m ja keskimääräinen raiteen syvyys 0,6 cm. Vaikka urat oli suunnattu keskimääräistä vähäpuustoisempiin kohtiin, ajourien määrää voidaan pitää suurena. Hakkuukoneen raiteenmuodostus oli vähäistä. Puiden tuonti käsiteltäväksi uran päällä, jolloin ajoalustalle saatiin lisää havutusta, ei vaikuttanut merkittävästi hakkuun ajanmenekkiin.

Rungon koko ja kuljettaja olivat tärkeimmät hakkuutyön tuottavuuteen vaikuttavat tekijät. Tuottavuuteen vaikuttivat lisäksi puulaji, puun ottokulma ja ottoetäisyys sekä puuston määrä työalueella. Pystypuihin syntyvien kosketusten todennäköisyyttä selittivät kuljettaja, käsiteltävän rungon koko ja puiden lukumäärä työalueella. Vaurion syntyyn kosketuksesta vaikuttivat vuodenaika ja kosketuksen aiheuttaneen rungon koko.

Puustovaurioiden ennustamiseksi laadittiin Excel-taulukkolaskentaohjelmassa toimiva laskentamalli. Mallin pääosat ovat kosketusmalli ja kosketusten seurausmalli, jotka on laadittu logistista regressiota hyväksi käyttäen. Puustovaurioiden ennustemallia sekä työn tuottavuutta kuvaavia malleja voidaan käyttää esimerkiksi eri harvennusvaihtoehtojen vertailuun mallileimikoissa.

Keskeinen tutkimustulos oli korjuujäljen ja tuottavuuden voimakas riippuvuus kuljettajasta sekä suuri kuljettajien välinen vaihtelu. Tutkimusaineistossa korkea työn tuottavuus ja hyvä korjuujälki kulkivat käsi kädessä. Korjuujäljen suuren vaihtelun takia jatkuva korjuujäljen valvonta ja kuljettajien koulutus ovat välttämättömiä.

Avainsanat: hakkuukone, harvennukset, puustovauriot, harvennusvoimakkuus, ajourat, työn tuottavuus, logistinen regressio

Kirjoittajan yhteystiedot: Metsäntutkimuslaitos, Vantaan tutkimuskeskus, PL 18, 01301 Vantaa, puhelin (09) 857 051, faksi (09) 8570 5361

Julkaisija: Metsäntutkimuslaitos. Hanke: 3149. Hyväksynyt: tutkimusjohtaja Matti Kärkkäinen 12.6.1998.

Tilaukset: Metsäntutkimuslaitos, Helsingin tutkimuskeskus, Unioninkatu 40 A, 00170 Helsinki. Puhelin (09) 8570 5721, faksi (09) 8570 5717

Sirén, M. 1998. One-grip harvester operation, it's silvicultural result and possibilities to predict tree damage. Finnish Forest Research Institute. Research Papers 694. 179 p. ISBN 951-40-1635-1, ISSN 0358-4283

In Finland, almost 70 % of thinnings are carried out mechanically using one-grip harvesters and forwarders. The silvicultural result of the thinning has, on average, been acceptable, but inventory results have revealed a great variation in tree damage between stands. Post-harvesting inventories have not always reliably explained the reasons for this variation.

Knowledge of the causes of damage and the factors affecting sensitivity to damage occurrence was gathered by real time observations of the damaging process. By relating the damage observation to the time consumption and movements of the machine, a general picture of cutting machine work was constructed. A post-cutting sample plot inventory determined the number, the quality and distribution of standing and removed trees at different distances from strip roads. The amount of tree damage and number of strip roads were also studied.

Tree damage was assessed by observing the number of contacts with standing trees and nature of the damage resulting from these contacts. The study material consisted of 8192 trees. The processing phases of a single tree was called a cycle. On average, 19.3 percent of cycles involved contacts with standing trees. The average percentages varied from 14.5 to 25.4 with different operators. One third of the contact trees were removed during harvesting operations. Of the struck trees left standing, 28.2 % were damaged. The probability of contact damage was 1.5-fold higher in the summer than in other seasons of the year. Small, longitudinal, superficial damage was typical.

The number and distribution of remaining trees were according to directives. The thinning was typical low thinning. The average distance between strip roads was 19.8 m, strip road width 4.8 m and rut depth 0.6 cm. Even though the strip roads tended towards less dense stand areas, the amount of strip roads were nonetheless considered to be large. Rut formation by the cutting machine was slight. Processing trees above the strip road enabled more slash to be placed on strip roads, and this did not significantly affect on the time consumption of cutting.

The stem volume and machine operator were the two most significant factors affecting the cutting productivity. Tree species, the gripping angle, gripping distance and number of trees on the processing area also had an effect on productivity. Contacts with standing trees were explained by machine operator, stem volume of processed tree and the number of trees on the working area. The probability of damage resulting from contact was explained by harvesting season and size of processed tree.

A calculation model using MS Excel software was developed to predict tree damage. The model consisted of a contact model and a damage model formulated using logistic regression. The tree damage model and the productivity models can be used, for example, in comparing different thinning regimes in model stands.

The main result of the study was that the operator had considerable influence on both the harvesting quality and productivity, and that there was a large variation between machine operators. In the study material, high productivity and a good silvicultural result were highly correlated. Due to the high variation in the harvesting quality, both the continuing supervision of silvicultural thinning quality and the training of machine operators are absolutely necessary.

Key words: one-grip harvester, thinnings, tree damage, thinning intensity, strip roads, productivity, logistic regression

Sisällys

	Sivu
Tutkimuksessa käytettyjä termejä ja luokituksia	8
Alkusanat	9
1 Johdanto	11
2 Katsaus nykytietoon korjuujäljestä	13
2.1 Korjuujäljen käsite ja korjuujäljen seurausvaikutukset	13
2.2 Korjuujäljen inventointimenetelmät	15
2.3 Inventointitulosten vertailtavuus	17
2.4 Ajouraleveyden mittaaminen	19
2.5 Korjuujälki Suomessa ja Ruotsissa	20
2.5.1 Puustovaurioiden määrä moottorisahahakkuussa ja metsäkuljetuksessa	20
2.5.2 Puustovaurioiden määrä koneellisessa hakkuussa	22
2.5.3 Puustovaurioiden koko, laatu, sijainti ja aiheuttaja	24
2.5.4 Ajourat ja urapainumat	27
2.5.5 Poistuman määrä, laatu ja jakautuminen	29
2.6 Korjuujälki muissa maissa	33
2.7 Korjuujälkeen vaikuttavat tekijät	36
2.7.1 Korjuumenetelmä	36
2.7.2 Työolot	37
2.7.3 Harvennustapa, ajourasto, korjuukone ja työskentelytapa	38
2.7.4 Kuljettaja, työn tuottavuus, korjuun suunnittelu ja valvonta	40
2.7.5 Liiketyön määrä	41
3 Työn tuottavuus hakkuukonetyössä	42
4 Tutkimustehtävä ja sen rajaukset	47
5 Tutkimusmenetelmä ja -aineisto	49
5.1 Tutkimusmenetelmän valinta	49
5.2 Työntutkimus	51
5.3 Jälki-inventointi	53
5.4 Tutkimusleimikoiden valinta	54
5.5 Tutkimusaineisto	55
6 Aineiston analysointi	56
7 Tutkimustulokset	60
7.1 Työn tuottavuus ja siihen vaikuttavat tekijät	60
7.1.1 Tuottavuus tutkimusleimikoissa	60
7.1.2 Työvaiheiden tehoajanmenekit	61
7.1.3 Liiketyön määrä ja siihen vaikuttavat tekijät	74
7.2 Hakkuukonetyön korjuujälki	78
7.2.1 Kosketukset ja niistä syntyneet puustovauriot	78
7.2.2 Jälki-inventoinnin tulokset	83
7.2.2.1 Jälki-inventoinnin aineisto	83
7.2.2.2 Ajourat ja raiteenmuodostus	84
7.2.2.3 Jäävän puuston ja poistuman määrä ja rakenne	85

7.2.2.4 Puustovaurioiden määrä, laatu ja sijainti 90
7.2.3 Työntutkimuksen ja jälki-inventoinnin vauriotulosten vertailu 93
7.2.4 Vertailuleimikoiden korjuujälki 96
7.2.5 Tutkimuksessa todetun korjuujälkitason seurausvaikutukset 99
7.3 Puustovaurioiden määrän ennustaminen 103
7.3.1 Mallin rakenne 103
7.3.2 Perusteita logistisen regression käytölle 105
7.3.3 Logistisen mallin tulkinta ja parametrien testaus 108
7.3.4 Kosketusmallit 110
7.3.5 Kosketusten seurausmallit 118
7.3.6 Mallien toimivuus 124
8 Tulosten tarkastelu 127
8.1 Tutkimusmenetelmä ja -aineisto 127
8.2 Työn tuottavuus ja siihen vaikuttavat tekijät 129
8.3 Liiketyön määrä ja siihen vaikuttavat tekijät 130
8.4 Kosketukset ja niistä syntyneet puustovauriot 133
8.5 Jälki-inventoinnin tulokset 136
8.6 Vertailuleimikoiden inventointitulokset 138
8.7 Korjuujäljen taloudellinen merkitys 139
8.8 Puustovaurioiden ennustaminen 139
8.9 Päätelmiä ja tulevaisuuden tutkimustarpeita 143
9 Seloste 146
Kirjallisuus 156
Liitteet 169

Tutkimuksessa käytettyjä termejä ja luokituksia

Työntutkimus: Tapahtuma-aikainen hakkuukonetyön tutkimus, jossa rekisteröitiin työvaiheiden ajanmenekki, työolot, hakkuulaitteen ja peruskoneen liikkeet, pystypuihin syntyneet kosketukset ja niiden aiheuttajat.
Jälki-inventointi: Hakkuun ja metsäkuljetuksen välissä tehty tutkimusleimikoiden jälkimittaus, jossa suorakaiteen muotoisilta vyöhykkeisiin jaetuilta koealoilta mitattiin jäävän puuston, poistuman ja raivattujen puiden määrä eri etäisyyksillä urista, puustovaurioiden määrä ja laatu sekä ajouraleveys ja raiteiden syvyys.
Liiketyö: Peruskoneen liikkeet ja hakkuulaitteen liikkeet nosturin tyven suhteen.
Tehollinen liiketyö: Hakkuulaitteen liikkuma matka (m/valmistettu runko tai m/valmistettu m^3) hakkuulaitteen viennissä puulle, puuta siirrettäessä, karsittaessa ja katkottaessa sekä tuotaessa hakkuulaite koneen lähelle.
Työsykli: Yhden puun käsittelyn kaikki työvaiheet.

Kosketusten ja puustovaurioiden seuranta ja luokitus:

Kosketus: Kosketus rekisteröitiin peruskoneen, koneen osan tai käsiteltävän puun koskettaessa pystypuun runkoa, oksistoa rungon lähellä tai juuristoa. Käsiteltävän puun hentojen oksien pystypuun oksistoon aiheuttamia pyyhkäisyjä ei luettu kosketuksiksi. Myöskään urapuihin kohdistuneita kosketuksia ei rekisteröity.

Osa kosketuksen saaneista puista poistettiin saman tien työn edetessä. Nämä puut luokiteltiin seuraavasti:
Metsänhoidollisesti kasvatettava puu: Puu, joka arvioitiin kasvatettavaan jaksoon kuuluvaksi.
Metsänhoidollisesti poistettava puu: Puu, joka arvioitiin poistettavaan jaksoon kuuluvaksi.

Työntutkimusjakson päätyttyä kosketuspuista samoin kuin jälki-inventoinnissa koealapuista mitattiin mahdolliset vauriot, jotka luokiteltiin:

Sijainnin mukaan:
Runkovauriot: Vauriot puun rungossa kaatoleikkauskohdan yläpuolella.
Juurenniskavauriot: Vauriot juurenniskassa kaatoleikkauskohdan alapuolella tai juuristossa enintään 70 cm:n etäisyydellä rungosta.

Laadun mukaan:
Pintavauriot: Vauriot, joissa puun kuori on irronnut, mutta puuaines säilynyt vahingoittumattomana.
Syvävauriot: Vauriot, joissa puuaines vaurioitunut.
Katkovauriot: Puu on katkennut.

Tutkimusleimikoiden jaottelu korjuuajan mukaan:

Talvileimikot: Korjuuaikana maa jäässä ja lumen peittämänä.
Kevät-syysajan leimikot: Sulan maan leimikot pois lukien aika 1.5 - 15.8.
Kesäleimikot: Ajalla 1.5 - 15.8 korjatut leimikot.

Alkusanat

Tämä tutkimus on osa Metsätalouden ympäristövaikutusten tutkimusohjelman hanketta Puunkorjuun maasto- ja puustovaurioiden ja niiden kustannusten ennustaminen. Tutkimusohjelmaa ovat johtaneet MMT Leena Finér ja MMT Erkki Ahti. Hankkeen johtajana on toiminut MMK Jari Ala-Ilomäki.

Korjuujälkitutkimukset ovat olleet keskeinen osa työtäni koko tutkijanurani ajan. Korjuujälkitutkimuksen pariin minut vuonna 1980 ohjasivat professorit Pentti Hakkila ja Pertti Harstela. Tutkimustyössäni olen saanut toimia kiinteässä yhteistyössä suomalaisten metsäkoneenvalmistajien ja puunkorjaajien kanssa. Yhteistyö Metsätehon, erityisesti samaa aihepiiriä tutkineen MMK Risto Lillebergin kanssa, on ollut minulle erityisen mieluisaa ja antoisaa.

Tutkimusaineiston keruuseen ovat osallistuneet metsätalousteknikko Erkki Salo ja tutkimusmestari Veijo Salo. Puunkorjuuyritysten ja tutkimuskoneet omistaneiden Kone Rauhansuun, Veljekset Pesosen ja Arponen Ky:n myönteinen suhtautuminen on ollut edellytys tutkimuksen toteutumiselle. Aineiston keruussa Jämsänkosken Metsäoppilaitos ja erityisesti sen opettaja Jouko Berg ovat olleet suurena apuna.

Tulosten laskennassa ja ymmärtämisessä minua ovat neuvoneet suunnittelija Hannu Aaltio, VTK Risto Häkkinen, FK Anna-Maija Kokkonen ja FT Hannu Rita. Kuvat on piirtänyt tutkimusvirkailija Essi Puranen ja julkaisun taittanut tutkimusmestari Maija Heino. Englanninkielen tarkistuksen on tehnyt Ph.D Ashley Selby.

Käsikirjoituksen ovat tarkastaneet Helsingin yliopiston maatalous-metsätieteellisen tiedekunnan kutsumina esitarkastajina MMT, dosentti Jouko Mäkelä ja MMT Reino Pulkki sekä työn ohjaajana professori Rihko Haarlaa. Arvokkaita parannusehdotuksia käsikirjoitukseen ovat tehneet professorit Pentti Hakkila ja Esko Mikkonen sekä tutkimussihteeri Pirkko Kinanen.

Kaikille edellämainituille ja monille muille tutkimusta tukeneille henkilöille ja organisaatioille lausun parhaat kiitokseni.

Ihmisen elämä on usein paitsi Korkeimman myös muiden yhteiskuntaamme palvelevien ihmisten kädessä. Haluankin poikkeuksellisesti tässä yhteydessä kiittää lämpimästi LKT Marja Leivosta, jonka ammattitaito on antanut minulle mahdollisuuden tämän työn tekemiseen.

Lopuksi kiitos läheisilleni tuesta ja kannustuksesta.

Omistan tämän työn edesmenneelle isälleni Reinolle ja sille sukupolvelle, joka vietti nuoruutensa Suomen vapautta lunastamassa.

Jaalan Torronlahdessa, kesäkuussa 1998

Matti Sirén

1 Johdanto

Puunkorjuumenetelmät ja -koneet ovat kehittyneet viime vuosikymmeninä nopeasti. Koneellistamisen alkutaipaleella tutkittiin puunkorjuukoneiden tuottavuutta ja toimivuutta korjuujäljen tutkimuksen keskittyessä korjuumenetelmien ja -koneiden vertailuun. Pohjoismaissa päädyttiin tavaralajimenetelmän käyttöön osin korjuujälkeen liittyvin perustein, ja sama kehitys on parhaillaan käynnissä mm. osissa Venäjää ja Pohjois-Amerikkaa harvennushakkuiden yleistyessä.

Suomessa valtaosa harvennuksista tehdään koneilla. Vuonna 1996 metsäteollisuuden ja Metsähallituksen puunkorjuussa harvennuksista korjattiin koneellisesti 68 % (Oijala ym. 1997, s. 2). Harvennusten korjuukoneiksi ovat vakiintuneet ajourilta toimiva yksiotehakkuukone eli -harvesteri ja metsäkuljetuksen hoitava kuormatraktori. Samat koneet suoriutuvat sekä harvennuksista että päätehakkuista.

Metsänomistajat tiedostavat korjuujäljen merkityksen. Pelko huonosta korjuujäljestä saattaa vähentää metsänomistajien kiinnostusta harvennuksiin. Matilaisen (1995, s. 80 - 81) mukaan hyvä korjuujälki on metsänomistajien mielestä tärkein tulevaisuuden puunkorjuukoneelle asetettavista vaatimuksista. Myös suunnittelun kohteena olevassa sertifiointimenettelyssä korjuujälki on tärkeässä asemassa. Korjuujäljen merkitystä ja jatkuvan valvonnan tarpeellisuutta korostetaan myös Metsätalouden ympäristötyöryhmän mietinnössä (Metsätalous... 1994, s. 73). Työryhmä esittääkin korvausmenettelyn luomista huonosta korjuujäljestä aiheutuville tappioille.

Korjuujäljen tutkimusta on leimannut sirpalemaisuus. Tutkimus on ollut pääosin pinnallista ja tulosten yleistettävyys ja vertailtavuus huonoa. Vaikka NSR-yhteistyön (NSR = Nordiska Skogsteknologiska Rådet) puitteissa on korostettu tulosten vertailtavuuden tärkeyttä, pohjoismaisetkin korjuujäljen mittausmenetelmät ovat poikenneet maittain ja maiden sisälläkin. Korjuujäljen biologisten ja taloudellisten seurausten tiedostaminen ja yhteensovittaminen on myös ollut puutteellista. Korjuujälkeä ovat mitanneet teknologit, seurausvaikutuksia taas biologit. Varsin vähän on pohdittu, mitä metsässä olisi mitattava, jotta seurauksia voitaisiin ennustaa. Vasta viime vuosina Suomessa on pyritty yhtenäistämään korjuujäljen inventointimenetelmiä (Harvennushakkuiden korjuujäljelle... 1990).

Spinelli (1995, s.13) selvitti EU-hankkeen "Cost Effective Early Thinnings" puitteissa suhtautumista korjuujälkikysymyksiin. Tutkimukseen osallistui 14 Euroopan maata, joista korjuujäljen tutkimusta vuosina 1991 - 97 tehtiin 12 maassa 28 tutkimuslaitoksessa. Tutkimuslaitokset pitivät puustovaurioita korjuun suurimpana huolenaiheena. Myös maaperävaurioista kannettiin huolta.

Kootessaan maailmanlaajuisen 2500 viitettä sisältävän bibliografian vuoden 1980 jälkeen tehdyistä korjuujälkitutkimuksista Spinelli (1996, s. 20) näki erityisen puutteellisena korjuuvaurioiden taloudellisten seurausvaikutusten arvioinnin.

Työn tuottavuus vaikuttaa ratkaisevasti korjuumenetelmän valintaan. Suomessa erityisesti ensiharvennusten ongelmana ovat korkeat korjuukustannukset, joihin koneellistaminenkaan ei ole tuonut tyydyttävää ratkaisua. Vaikka harvennus on metsänhoidollinen toimenpide, jossa luodaan pohjaa metsän tuleville tuotoille, harvennusmetsiköiden käsittelyä on lähestytty pikemminkin koneiden tehokkaan käytön kuin puhtaan metsänhoidon kannalta. Esimerkkinä tästä on 1990-luvun taitteessa ajourakäytännössä tapahtunut muutos, jossa sallittiin aiempaa tiheämmän ajouraston käyttö.

Verraittain tiheäkään ajouraverkosto ei välttämättä ole pahasta, jos ajourat ovat kapeita eikä korjuussa synny merkittäviä puusto- tai maaperävaurioita. Kapeillakin ajourilla on silti riskinsä kuusikoissa. Saarnijoki (1939, s. 52) totesi tutkimuksessaan kuusen tyvilahosta seuraavaa: "hakkausaloilla sijainneiden talviteitten sekä polkujen varsilla saattoi havaita tyvilahoisten puiden määrän hyvin selvästi lisääntyvän".

Ansiokasta työtä ajourien vaikutuksista ja mittausmenetelmien vertailusta ovat Metsäntutkimuslaitoksessa tehneet Isomäki ja Niemistö (Isomäki 1986 ja 1994, Isomäki & Niemistö 1990, Niemistö 1987, 1988 ja 1989). Katsauksen eri maissa käytettäviin inventointimenetelmiin sekä korjuujäljen biologisiin ja taloudellisiin seurausvaikutuksiin ovat laatineet Kokko & Sirén (1996), jotka esittivät laskentamallin korjuujäljen taloudellisten vaikutusten arviointiin.

Korjuujäljen inventointi on maastotyön takia kallista. Jälkikäteen tehtävillä inventoinneilla saadaan tietoa korjuujäljestä, mutta puustovaurioiden syyt ja aiheuttajat jäävät arvionvaraisiksi. Siemenen käsillä olevalle tutkimukselle kylvivät ruotsalaiset Blomqvist ym. (1984, s. 3) ja Bredberg (1985, s. 126) esittäessään ajatuksen liiketyön määrän (trafikintensitet) vaikutuksesta korjuun tuottavuuteen ja korjuujälkeen. Ratkaisevaa ei ole niinkään työkoneen koko vaan pikemminkin eri tyyppisen liiketyön, esimerkiksi hakkuussa siirtymisen, hakkuulaitteen ja puun siirtelyn määrä.

Korjuujäljen syntyprosessia voidaan seurata myös työn tapahtumahetkellä. Tällöin korjuujälki voidaan yhdistää hakkuutyöhön, ja kullekin työvaiheelle on mahdollista määrittää oma vaurioriskinsä ja siihen vaikuttavat tekijät. Seuraamalla samanaikaisesti korjuujälkeä, hakkuutyön ajanmenekkiä ja työkoneen liikkeitä hakkuutyötä voidaan tarkastella kokonaisvaltaisesti.

2 Katsaus nykytietoon korjuujäljestä

2.1 Korjuujäljen käsite ja korjuujäljen seurausvaikutukset

Seuraavassa tarkastellaan korjuujäljen käsitettä, mittaamista ja keskimääräistä tasoa teoreettisesti ja kirjallisuuden valossa. Tarkastelun painopiste on Pohjoismaiden tilanteessa ja koneellisessa hakkuussa, jossa sekä hakkuu että metsäkuljetus tehdään koneilla. Pohjoismaisen tavaralajimenetelmän korjuujälki poikkeaa muualla maailmassa vallitsevana olevien pitkän puun korjuumenetelmien jäljestä. Myös korjuujäljen tutkimusmenetelmät vaihtelevat maailmalla. Tämän vuoksi tarkastellaan suppeammin korjuujälkitutkimusta ja -tuloksia myös muualla maailmassa, erityisesti Pohjois-Amerikassa.

Korjuujäljellä tarkoitetaan metsikön puuston ja maaperän tilaa puunkorjuun jälkeen. Käsitteeseen sisällytetään yleensä puustovauriot, ajourapainumat, ajouraväli ja -leveys sekä leimikon harvennusvoimakkuus ja puuvalinta. Puustovauriot jaetaan sijaintinsa perusteella runko- ja juurenniskavaurioihin. Runkovaurioihin luetaan puun rungossa oletetun kaatoleikkauskohdan yläpuolella sijaitsevat vauriot, juurenniskavaurioihin vastaavasti kaatoleikkauskohdan alapuolella juurenniskassa ja maanpäällisissä, vähintään 2 cm paksuissa juurissa korkeintaan 100 cm:n etäisyydellä juurenniskasta sijaitsevat vauriot.

Syvyytensä perusteella vauriot jaetaan pinta- ja syvävaurioihin. Pintavaurioissa (kuva 1) pelkästään puun kuori on vahingoittunut, kun taas syvävaurioissa (kuva 2) myös itse puuaines on vaurioitunut. Vaurion koko ilmaistaan tavallisesti sen pinta-alana. Joissakin yhteyksissä koko on ilmaistu myös vaurion leveytenä tai osuutena rungon vaipasta (Andersson 1984, s. 56 - 61).

Suomessa puustovauriot ovat olleet korjuujäljen keskeinen kiinnostuskohde, mutta maailmanlaajuisesti vain 14 % korjuujälkitutkimuksista on käsitellyt puustovaurioita. Suurimman kiinnostuksen kohteena ovat puunkorjuun maaperävaikutukset, joita on käsitelty 57 %:ssa aihealueen tutkimusjulkaisuista (Spinelli 1995, s. 17).

Ajourat ja ajourapainumat kuuluvatkin keskeisinä osatekijöinä korjuujälkeen. Ajourat aiheuttavat kasvutappioita kahdesta syystä. Ajouria avattaessa optimaalisesta puuvalinnasta joudutaan poikkeamaan, kun kasvatettavaksi tarkoitettuja puita poistetaan ajourilta. Toisaalta osa ajoura-aukoista jää hyödyntämättä kasvutilana (Bucht 1977, s. 221). Ajourapainumat puolestaan aiheuttavat kasvutappioita juuristo- ja maaperävaurioiden seurauksena (Wästerlund 1983, s. 103).



Kuva 1. Tyypillinen pintavaurio. Puuaines säilynyt vaurioitumattomana (kuva P. Kokko).



Kuva 2. Tyypillinen syvävaurio. Myös puuaines vaurioitunut (kuva P. Kokko).

Harvennusvoimakkuus ja puuvalinta liittyvät korjuujälkeen. Harvennusvoimakkuus kertoo, onko puuston tiheys hakkuun jälkeen suositusten mukainen. Puuvalinta ilmentää harvennuksen kohdistumista metsänhoidollisesti oikeisiin puihin. Harvennuksessahan tulisi poistaa huonolaatuiset sekä metsikön kehityksessä jälkeen jääneet puut. Ajourilta poistettu puusto kuvaa osaltaan ajourien sijoittelun onnistumista, sillä ajourat olisi avattava kasvatettavaa puustoa säästäen mahdollisimman vähäpuustoisiin kohtiin. Harvennusvoimakkuus ja puuvalinta vaikuttavat keskeisesti metsikön tulevaan puuntuotantoon.

Huono korjuujälki johtaa kasvu- ja laatutappioihin sekä sekundäärituhoihin. Kasvutappioita aiheutuu ajourista, urapainumista ja puustovaurioista. Laatutappioiden lähteinä ovat puustovaurioita seuraavat lahoutuminen ja koroutuminen. Kuusella vaurioituminen johtaa lähes aina lahon syntyyn. Kuusen lahonherkkyyden ovat todenneet mm. Ernberg (1907, s. 176 - 179), Nordfors (1923, s. 179 - 180), Ekbom (1928), Pawsey & Gladman (1965), Hakkila & Laiho (1967, s. 27), Nilsson & Hyppel (1968), Kärkkäinen (1971, s. 228), Kallio (1973, s. 10 - 11), Isomäki & Kallio (1974, s. 9 - 16), Schönhar (1975), Huse (1978, 1983, s. 11), Meng (1978), Laiho (1983, s. 45), Solheim & Selås (1986), Solheim (1987, 1990), Solheim & Holen (1990) ja Moilanen (1990, s. 37 - 39). Koivun lahoherkkyys on samaa tasoa kuin kuusen. Männyllä suuret rungon syvävauriot aiheuttavat koroja, joista syntyy menetyksiä sahoille (Blomqvist 1984).

Korjuun sekundäärivaikutuksena voi syntyä hyönteis-, tuuli- ja lumituhoja. Tuhohyönteiset iskeytyvät vaurioiden heikentämiin puihin, ja juurivauriot altistavat puut myrskytuhoille. Sekundäärivaikutuksiin kuuluu myös kesäaikaisen harvennuksen maannousemariski. Alttius tuuli- ja lumituhoille lisääntyy harvennusvoimakkuuden kasvaessa.

Kokko & Sirén (1996) tarkastelivat pohjoismaiseen kirjallisuuteen perustuen korjuujäljen seurausvaikutuksia ja laativat laskentamallin korjuujäljen seurausvaikutusten arviointiin. Tämän vuoksi korjuujäljen seurausvaikutuksiin ei käsillä olevassa tutkimuksessa puututa laajemmin. Kokon & Sirénin (1996, s. 45 - 54) laskentamallia käytetään kuitenkin myöhemmin tässä tutkimuksessa esitettävässä esimerkkilaskelmassa.

2.2 Korjuujäljen inventointimenetelmät

Korjuujälkeä on tutkittu sekä laaja-aineistoisilla korjuujälki-inventoinneilla että konetutkimusten yhteydessä tehdyillä selvityksillä. Inventointimenetelmien kirjavuus on vaikeuttanut tulosten vertailua ja yleistettävyyttä.

Kärkkäisen (1969, s. 8) mukaan puuston vaurioitumista tutkittaessa tutkimuspopulaation alkioina voivat olla joko harvennushakkuutyömaat tai

yksittäiset puut. Kärkkäinen pitää työmaata parempana vaihtoehtona, koska yksittäisen puun vaurioituminen on poikkeuksellinen tapahtuma.

Metsäntutkimuslaitoksessa tehtiin 1980-luvulla kolme korjuujälki-inventointia (Sirén 1981, Sirén 1982 ja Sirén 1986a). Puustovauriot inventoitiin kulkemalla koko leimikko järjestelmällisesti läpi. Puuston määrä, puulajijakauma ja puuston koko mitattiin mittauslinjoille sijoitettavilta koealoilta.

Metsätehon käyttämässä inventointimenetelmässä (Lilleberg 1984, s. 12-13) puustovaurioiden tutkimus perustuu koko leimikon tai leimikon osan inventointiin. Puuston määrä mitataan koealoilta. Maaperän ja juuriston vaurioituminen määritellään yli 10 cm:n syvyisen urapainuman metrimääränä hehtaarilla. Ajouraleveys mitataan Digglen & Knutellin (1979) esittämällä Kniggle-menetelmällä.

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio aloitti korjuujäljen seurannan lähinnä valvontamielessä vuonna 1990. Kaksiosaisessa inventointimenetelmässä (Harvennushakkuiden korjuujäljelle... 1990) mitataan aluksi yleisarvioinnilla puuston määrää, ajourien leveyttä ja ajouraväliä sekä havainnoidaan puusto- ja maaperävaurioiden määrää. Jos leimikko selvästi täyttää Tapion hyvälle korjuujäljelle asettamat vaatimukset, leimikosta tehdään tarkistusselostus. Jos korjuussa todetaan puutteita, aloitetaan systemaattiset mittaukset. Puustovaurioiden toteaminen perustui vuosina 1990 - 1992 koko leimikon läpikäyntiin, vuodesta 1993 lähtien Tapio on mitannut puustovauriot ympyräkoealoilta käyttäen sovellutusta Ruotsin Metsäkorkeakoulussa kehitetystä mittausmenetelmästä (Björheden & Fröding 1986).

Ruotsin Metsäkorkeakoulun käyttämä mittausmenetelmä (Björheden & Fröding 1986), josta myöhemmin tässä tutkimuksessa käytetään nimitystä SLU-menetelmä, perustuu mittauslinjoille määrävälein sijoitettaviin 100 m^2:n ympyräkoealoihin. Koealaväli määräytyy leimikon koon perusteella. Hehtaarin kokoiselta leimikolta mitataan noin 25 koealaa. Leimikon koon kasvaessa hehtaarikohtainen koealamäärä vähenee. Koealoilta mitataan jäävän puuston määrä, kantojen määrä, pystyyn jääneiden mutta metsänhoidollisesti poistettaviksi arvioitujen puiden määrä, vauriopuiden määrä sekä vaurioiden koko, laatu ja sijainti.

Ajouratiedot mitataan jokaista ympyräkoealaa lähinnä olevalta ajouralta. Ensiksi mitataan ajouran keskilinjan kohtisuora etäisyys koealasta. Ajourapainuman syvyys mitataan kohdasta, johon koealalta saavutaan. Ajouraleveys mitataan 20 metrin jaksolta mittaamalla kohtisuora etäisyys uran keskeltä lähimpiin oikealla ja vasemmalla oleviin puihin ja laskemalla nämä etäisyydet yhteen.

Ruotsalainen SkogForsk on käyttänyt erilaisia korjuujäljen mittausmenetelmiä. Nordbergin (1985) kehittämässä menetelmässä mittaukset tehdään ajourien

väliin sijoitettavilta 10 m:n levyisiltä vyöhykkeiltä. Näiltä mitataan runkoluku, vauriopuiden määrä, ajouraleveys- ja väli sekä yli 10 cm syvien painumien määrä. Ajouraleveys mitataan määrittämällä raiteesta etäisyys lähimpään puuhun, ja lisätään tähän etäisyyteen lähinnä mittauskohtaa olevan, vastakkaisella puolella uraa sijaitsevan puun etäisyys samaan raiteeseen.

Pohjois-amerikkalainen korjuujäljen tutkimus poikkeaa usein lähestymistavaltaan pohjoismaisista tutkimuksista, joissa on tuotettu tietoa lähinnä vaurioiden määristä. Pohjois-Amerikassa on pyritty ennustamaan yksittäisen puun vaurioitumisen todennäköisyyttä ja siihen vaikuttavia tekijöitä. Puuston vaurioitumista on tutkittu koealoilta, joilta on mitattu esimerkiksi puiden etäisyys juontourasta ja todettu, onko puu vaurioitunut vai ei. Yksittäisen puun vaurioitumisen todennäköisyyttä on selitetty logistisilla regressiomalleilla (Ostrofsky ym. 1986, s. 1240 - 1242, Cline ym. 1991, s. 73 - 74, Nichols ym. 1994, s. 354).

Osasyynä erilaisiin lähestymistapoihin pohjoismaisessa ja pohjois-amerikkalaisessa vauriotutkimuksessa lienevät vauriomäärien erot tavaralajimenetelmässä ja erilaisissa pitkän puutavaran menetelmissä. Pohjois-amerikkalaisissa tutkimuksissa todetut vauriomäärät ovat usein olleet suuria. Tällöin yksittäisen puun vaurioituminen ei enää ole ollutkaan Kärkkäisen (1969, s. 8) kuvaama poikkeuksellinen tapahtuma. Vauriot keskittyvät esimerkiksi vintturijuontourien varteen, jolloin yksittäisen puun vaurioitumisen ja siihen vaikuttavien tekijöiden ennustaminen on mielekästä. Tulosten esittäminen pohjois-amerikkalaiseen tapaan ennustemallien muodossa on ehkä informatiivisempi ja yleistettävämpi tapa kuin vauriomääriin painottunut pohjoismainen käytäntö.

2.3 Inventointitulosten vertailtavuus

Korjuujäljen inventointi vaatii maastotyötä ja on kallista. Menetelmien kehittämiseen sekä tulosten vertailtavuuteen ja käyttökelpoisuuteen on kiinnitetty yllättävän vähän huomiota. Ruotsalaisissa korjuujälki-inventoinneissa todettiin 1980-luvulla selvästi korkeampia vauriomääriä kuin suomalaisissa inventoinneissa, jotka toisaalta keskenään antoivat samantasoisia tuloksia. Taso-ero tuloksissa antoi aiheen inventointimenetelmien vertailuun. Vuonna 1986 Metsäntutkimuslaitos ja Ruotsin Metsäkorkeakoulu inventoivat samat viisi leimikkoa kokonaispinta-alaltaan 14,4 ha kumpikin omilla menetelmillään (Sirén 1986b).

Keskimääräinen vaurioprosentti Metsäntutkimuslaitoksen käyttämällä koko leimikon läpikäyntiin perustuvalla menetelmällä oli 4,8, ruotsalaisella ympyräkoealamittauksiin perustuvalla menetelmällä vastaavasti 7,2. Ruotsalaisella menetelmällä todettiin huomattavasti enemmän pinta-alaltaan pieniä runkovaurioita. Keskimääräiset ajouraleveydet, ajouravälit ja ajourapainumien syvyydet eivät poikenneet menetelmittäin merkittävästi.

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion aloitteesta verrattiin Tapion vuodesta 1990 käyttämää inventointimenetelmää (Harvennushakkuiden korjuujäljelle... 1990) ja ympyräkoealoihin perustuvaa SLU-menetelmää (Björheden & Fröding 1986). Vertailussa mitattiin 11 noin 2 ha:n suuruista leimikkoa. Ympyräkoealojen väli oli 20 - 35 m, jolloin koealat käsittivät noin 10 % leimikon pinta-alasta (Poikela 1992).

Mittaustavat antoivat ajouravälistä ja painuman määrästä samansuuntaiset tulokset. Puustovaurioiden osalta mittaustulokset erosivat selvästi. Keskimääräinen vaurioprosentti koko leimikon inventointiin perustuvalla menetelmällä oli 2,4 ja koealamittausmenetelmällä 8,5. Koealaotantaan perustuva menetelmä antoi 3,5-kertaiset vauriomäärät koko leimikon inventointiin verrattuna. Juurivaurioissa ero oli pienempi, mutta niissäkin koealamittausmenetelmä antoi keskimäärin kaksinkertaiset juurivaurioprosentit Tapion käyttämään menetelmään verrattuna (Poikela 1992).

Konehakkuuleimikoissa vauriopuita on kaukanakin urista, ja vauriot saattavat sijaita korkealla rungoissa. Tällöin pääosin ajourilta tehtävällä havainnoinnilla ei päästä hyvään lopputulokseen. Sen sijaan 100 m^2:n koealoilta inventoija havaitsee vauriot verraten helposti. Työntekijä ja sää vaikuttavat koealamittausmenetelmässä tulokseen vähemmän kuin koko leimikon havainnoinnissa. Poikelan (1992) tulosten perusteella Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio siirtyikin vuonna 1993 käyttämään koealamittauksiin perustuvaa menetelmää.

Poikela (1992) selvitti myös mittausmenetelmien ajanmenekkiä. Koko leimikon läpikäynnin kokonaisajanmenekki oli 80 - 125 minuuttia/ha, pienellä 0,7 ha:n kohteella 170 minuuttia/ha. Koealamittausmenetelmän ajanmenekki oli vastaavasti 120 minuuttia/ha.

Björheden & Fröding (1986) totesivat koealamittauksen hehtaarikohtaisen ajanmenekin pienenevän leimikon koon kasvaessa, koska leimikon pinta-ala vaikuttaa koealaväliin. Ajanmenekki oli 2 ha:n leimikoissa noin 80 minuuttia/ha, 10 ha:n leimikoissa vastaavasti alle 30 minuuttia/ha. Koko leimikon läpikäyntiin perustuvassa menetelmässä hehtaarikohtainen ajanmenekki ei oleellisesti pienene leimikon koon kasvaessa. Lisäksi leimikon pinta-alan mittaus vie aikaa. Koealamittauksessa leimikon tarkkaa pinta-alaa ei tarvita.

Ruotsissa Björheden (1986) vertaili SLU-menetelmää SkogForskin (Nordberg 1985) käyttämään mittaustapaan. Vertailussa 23 ha:n leimikko inventoitiin molemmilla menetelmillä kolme kertaa. Vauriopuiden osuudet mittauskerroittain olivat SLU-menetelmällä 9,9 %, 11,6 % ja 11,8 %, SkogForskin menetelmällä vastaavasti 4,8 %, 9,3 % ja 20,0 %. Vauriomäärien suuri vaihtelu SkogForskin menetelmällä johtui Björhedenin (1986) mukaan otoskoon riittämättömyydestä. Muiden tekijöiden, kuten uratietojen ja jäävän

puuston määrän suhteen tulokset olivat lähellä toisiaan. Luotettava vaurioiden ja niiden laadun toteaminen edellyttää aina riittävän suurta otosta.

Yhdysvalloissa Pilkerton ym. (1996) vertailivat neljää otantamenetelmää puustovaurioiden toteamisessa köysiratajuontoleimikoissa. Vertailtavina olivat mittauslinjoilta systemaattisesti mitatut ympyräkoealat, systemaattiset linjakäytävät, juontourien varrelle sijoitetut mittauslohkot ja täysin satunnaisesti tutkimusalueelle sijoitetut ympyräkoealat. Mittausmenetelmiä arvioitaessa otettiin huomioon tulosten luotettavuus, mittaustyön ajanmenekki sekä mittausten tarkistusmahdollisuus. Eri näkökohdat huomioon ottaen Pilkerton ym. (1996, s. 68) pitivät mittauslinjoilta systemaattisesti mitattuja ympyräkoealoja sopivimpana puustovaurioiden mittausmenetelmänä.

2.4 Ajouraleveyden mittaaminen

Ajouraleveyden tarkka määrittäminen on vaikeaa. Tutkimustuloksia tai ohjeita ajouraleveydestä esitetään usein mittaustapaa ilmoittamatta. Tällöin ajouratulosten vertailu ja yleistettävyys on mahdotonta. Ajouraleveyskäsitteitä ja mittausmenetelmiä ovat laajasti esitelleet Isomäki & Niemistö (1990) ja Isomäki (1994). Koska ajourien määrä ja laatu kuuluvat kiinteästi korjuujälkeen, esitellään ajourien mittaustapoja lyhyesti Isomäen & Niemistön (1990) sekä Isomäen (1994) esittämän jaottelun mukaan.

Isomäki & Niemistö (1990, s. 11 - 15) ja Isomäki (1994, s. 14) jakavat menetelmät korjuuteknistä ajouraleveyttä ja puuntuotannollista ajouraleveyttä mittaaviin tapoihin. Korjuuteknisiin leveyskäsitteisiin luetaan ajouran tavoiteleveys, jolla tarkoitetaan korjuukoneen tilantarvetta eli liikkuvuudelle ja työskentelylle riittävää ajouraleveyttä. Korjuuteknistä ajouraleveyttä mittaa myös ajouran ulkoleveys, joka vastaa koneen käytettävissä olevaa koko ajouratilaa.

Puuntuotannollisella ajouraleveydellä puolestaan ymmärretään joko ajouralta poistetun puuston mukana menetettyä kasvua, jolloin puhutaan ajouran puustoleveydestä, tai reunapuiden väliin ajouran keskelle vajaakäyttöiseksi jäävää kasvutilan pinta-alaa, ajouran sisäleveyttä. Puuntuotannollisella ajouraleveydellä kuvataan ajouran vaikutusta puuston kasvuun ja tuotokseen.

Ajouran korjuuteknisen tavoiteleveyden määrittämiseksi on kehitetty useita mittausmenetelmiä, kuten Sondellin (1974), Arvidssonin & Knutellin (1977), Buchtin (1978 ja 1981, s. 230 - 234) sekä Digglen & Knutellin (1979) kehittämät menetelmät. Näistä teoreettisesti edistyksellisin on Digglen & Knutellin (1979) kehittämä Kniggle-menetelmä. Myös Ruotsin Metsäkorkeakoulun ja Metsäntutkimuslaitoksen inventoinneissaan käyttämä SLU-menetelmä (Björheden & Fröding 1986) mittaa korjuuteknistä tavoiteleveyttä.

Ulkoleveys antaa huomattavasti suuremman uraleveyden kuin muut leveyskäsitteet. Isomäki & Niemistö (1990, s. 13) laskivat 20 ensiharvennuskuusikkoa käsittävästä aineistosta ajouraleveydet eri menetelmillä. Mittaustavasta riippuen keskimääräinen uraleveys oli pienimmillään 1,63 m (sisäleveys) ja suurimmillaan 5,12 m (ulkoleveys). Suomessa yleisesti käytetty Kniggle-menetelmä antoi arvoksi 3,43 m ja SLU-menetelmä 4,26 m.

Poikelan (1992) vertailussa 11 leimikolla uraleveys Kniggle-menetelmällä mitattuna oli keskimäärin 3,60 m, SLU-menetelmällä vastaavasti 4,60 m. Sovittaessa suositusarvoja ajouraleveydelle tai käytettäessä leveyttä ajouran seurausvaikutusten arviointiin on mittaustapa otettava huomioon. Mittausmenetelmän valintaan vaikuttaa myös mittaustavan soveltuminen käytännön mahdollisuuksiin; metsässä suoritettavat mittaukset eivät saa olla liian monimutkaisia tai aikaa vieviä.

2.5 Korjuujälki Suomessa ja Ruotsissa

2.5.1 Puustovaurioiden määrä moottorisahahakkuussa ja metsäkuljetuksessa

Suomessa korjuujälkitutkimuksia ovat tehneet mm. Metsäntutkimuslaitos, Metsäteho, Työtehoseura ja Metsähallituksen kehittämisjaosto. Vuodesta 1990 lähtien korjuujälkeä on valvonut Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Ruotsissa korjuujäljen tutkimusta ovat tehneet sekä Ruotsin Metsäkorkeakoulu että SkogForsk. Seuraavassa esitellään korjuujäljen tasoa Suomessa ja Ruotsissa. Korjuujälkitutkimukset on tehty pääsääntöisesti hakkuun ja metsäkuljetuksen jälkeen. Esitettävät tulokset sisältävät kummankin työvaiheen vauriot, ellei tekstissä toisin mainita.

Moottorisahahakkuu ei aiheuta merkittäviä puustovaurioita. Kaadettavat puut saattavat kasvatettaviin puihin osuessaan irrottaa kuorta. Kaatovaurioiden merkitys on kokonaisuudessaan vähäinen. Puustovauriot syntyvät pääosin metsäkuljetuksessa.

Kärkkäinen (1969) selvitti puuston vaurioitumista kesäaikaisessa puunkorjuussa. Tutkimusleimikoissa puutavara kasattiin metsäkuljetusurien varteen. Puustovauriot keskittyivät ajourien reunapuihin. Vauriopuiden määrää tutkimusleimikoilla selittivät ajourien määrä, maalaji, hakattu puumäärä (m^3/ha) sekä puuston määrä (m^3/ha) hakkuun jälkeen. Kärkkäisen (1969, s. 19) mukaan vaurioituvien puiden lukumäärä riippuu ensisijaisesti siitä, miten monella puulla on mahdollisuus vaurioitua. Lyhytulotteisia kuormaimia ja uran varteen kasausta käytettäessä vaurioalttiina olivat ainoastaan urien reunapuut.

Maataloustraktorin ja metsätraktorin korjuujälkeä vertailtiin 1980-luvun alussa. Sirénin (1981, s. 6) inventoinnissa keskimääräinen vaurioprosentti maataloustraktorileimikoissa oli 2,2, metsätraktorileimikoissa vastaavasti 1,5. Samansuuntaisia tuloksia saivat myös Lilleberg (1984, s. 7) ja Högnäs (1982). Ruotsissa Fröding (1982, s. 40) inventoi 101 harvennusleimikkoa ja totesi huomattavasti korkeampia vauriomääriä kuin suomalaisissa tutkimuksissa. Puutavaraa metsätraktorilla kuljetettaessa leimikoissa oli vaurioitunut keskimäärin 8,0 %, maataloustraktorilla kuljetettaessa vastaavasti 3,5 % jäävästä puustosta. Vauriotasojen erilaisuus Suomessa ja Ruotsissa johtunee pääosin erilaisista inventointimenetelmistä.

Metsätraktorikalusto alkoi 1980-luvun puolivälissä keventyä ja samalla ulottumaltaan 9 - 10 m:n kuormaimet vähensivät puutavaran kasaustarvetta. Kasaustarpeen vähennyttyä 4 - 5 m:n pituisen puutavaran teko yleistyi. Pieniä, omapainoltaan noin 8 tonnin metsätraktoreita kehitettiin erityisesti harvennuksiin. Turvemaiden ympärivuotisen puunkorjuun mahdollistamiseksi kehitettiin pienehköjä tela-alustaisia ajoneuvoja. Lilleberg (1986, s. 3) selvitti korjuujälkeä uudistuneen kaluston ja menetelmien ajoneuvoja käytettäessä. Keskikokoinen metsätraktori vaurioitti keskimäärin 0,9 %, pieni metsätraktori 1,3 % ja telamaasturi 0,9 % jäävästä puustosta. Hakkuumenetelmistä verrattiin kasausta ajouran varteen, kasausta vyöhykkeelle ja kasausta palstalle. Vaurioprosentit olivat vastaavasti 0,6, 0,9 ja 0,8. Tutkimuksessa ei inventoitu juurivaurioita.

Vuonna 1990 Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio inventoi 88 moottorisahalla hakattua leimikkoa, joissa puut oli kuljetettu metsätraktorilla (Harvennushakkuiden korjuutyön... 1990). Keskimääräinen vaurioprosentti (juurivaurioita ei mukana) oli 0,6. Vuonna 1991 vaurioprosentti oli keskimäärin 0,7 (Hartikainen 1991) ja vuonna 1992 vastaavasti 0,5 (Hartikainen 1992). Vuosien 1993 ja 1994 vauriomäärät eivät ole suoraan verrattavissa aiempiin mittausmenetelmän muututtua koealamittaukseen perustuvaksi. Vuonna 1993 keskimääräinen vaurioprosentti miestyönä hakatuissa leimikoissa oli 1,5 (Hartikainen 1993) ja vuonna 1994 vastaavasti 1,3 (Hartikainen 1994).

Frödingin (1992b, s. 9, 22) korjuujälkitutkimuksen 403 leimikosta 31,5 % oli hakattu moottorisahalla. Verrattuna 1980-luvun alun vauriomääriin (Fröding 1982, s. 40) korjuujälki oli parantunut, sillä keskimääräinen vaurioprosentti moottorisaha-hakkuuleimikoissa oli 3,0 sen oltua vuosikymmen aiemmin 8,0.

Miestyövaltaisiin hakkuumenetelmiin kuuluu myös erilaisia osapuu- ja kokopuumenetelmiä. Niiden riskinä on nähty maaperän vaurioituminen, koska ajourille saadaan vain vähän hakkuutähteitä. Sirénin (1986a, s. 6) tutkimuksessa keskimääräinen vaurioprosentti osapuumenetelmällä oli 2,5. Ruotsissa Fröding (1983a) totesi osapuumenetelmässä vaurioituneen keskimäärin 12,9 % jäävästä puustosta, vuosikymmen myöhemmin vastaavasti 5,9 % (Fröding 1992b, s. 22).

2.5.2 Puustovaurioiden määrä koneellisessa hakkuussa

Koneellisen harvennuksen alkuaikoja leimasivat korkeat vauriomäärät. Yksioteprosessori-metsätraktori korjuuketjulla vaurioprosentti oli 1980-luvun alussa Suomessa keskimäärin 11,1 (Sirén 1982, s. 5) ja Ruotsissa 13,4 (Fröding 1983b, s. 18). Kaksioteprosessoreilla Fröding (1983b, s. 18) totesi vieläkin suurempia vauriomääriä. Osasyinä vaurioiden runsauteen saattoivat olla kuljettajien kokemattomuus ja tietämättömyys korjuujäljen merkityksestä. Niinpä kokeessa, jossa kuljettaja tiesi korjuujälkeä seurattavan (Imponen & Sirén 1983, s. 10), keskimääräinen vaurioprosentti yksioteprosessorilla oli 6,0.

Mäkelä (1987, s. 4) tutki yksiotehakkuukonetta myöhemmissä harvennuksissa. Osa tutkituista menetelmistä oli täysin koneellisia, osassa ajourien keskiväli kaadettiin miestyönä. Vaurioprosentti tutkimusleimikoissa vaihteli välillä 2 - 10. Koneenkuljettajan valitessa poistettavat puut vaurioprosentti oli hieman alempi kuin etukäteen leimattaessa. Kuiton & Mäkelän (1988, s. 3) hakkuukonetutkimuksessa vaurioprosentti ensiharvennuksessa oli 0,5 - 2,6 ja toisessa harvennuksessa 1,7 - 4,5. Kuljettajan valitessa poistettavat puut vaurioita syntyi tässäkin tutkimuksessa vähemmän kuin etukäteen leimattaessa. Orke & Scherman (1986, s. 3) tutkivat Valmet 901 -yksiotehakkuukoneen korjuujälkeä. Vaurioprosentti vaihteli välillä 2,3 - 7,4. Menetelmässä, jossa ajourien keskivälin puut kaadettiin moottorisahalla, vaurioita syntyi vähemmän kuin koneen työskennellessä metsäkuljetusurien välissä hakkuu-uralla.

Mäkelä (1989a, s. 5) vertaili erikokoisia hakkuukoneita ensiharvennusmännikössä. Vaurioprosentti hakkuussa oli 0,3 - 2,5, metsäkuljetusvauriot mukaan lukien 0,6 - 3,7. Kuusikon ensiharvennuksessa vaurioprosentti oli hakkuussa keskimäärin 1,4, ja metsäkuljetuksessa vastaavasti 1,0 (Mäkelä 1989b, s. 5). Mäkelän (1990a, 1990b) vertaillessa eri konetyyppejä turvemaiden kesäaikaisessa puunkorjuussa keskimääräinen vaurioprosentti tutkimusleimikoilla oli 3,0. Hakkuussa vaurioitui keskimäärin 1,6 % ja metsäkuljetuksessa 1,4 % jäävästä puustosta. Alhaisin vaurioprosentti oli pienkoneketjun 0,8 ja korkein keskikokoisen hakkuukoneketjun 6,6. Koe osoitti turvemaiden kesäaikaisen korjuun olevan mahdollista usean tyyppisillä koneilla.

Laajimman pohjoismaisen korjuujälkiselvityksen on tehnyt Fröding (1992b) inventoidessaan Ruotsissa korjuujälkeä 403 leimikolla, joista vajaa puolet oli hakattu yksiotehakkuukoneella. Keskimääräinen vaurio-osuus konehakkuuleimikoilla (mukana myös metsäkuljetuksen vauriot) oli 5,9 % (Fröding (1992b, s. 22).

Ruotsalainen Lageson (1996, s. 7) vertaili ala- ja yläharvennuksen korjuujälkeä yksiotehakkuukoneilla. Tutkimuksessa rekisteröitiin ainoastaan hakkuuvaiheen yli 20 cm^2:n vauriot. Vauriomäärät eivät poikenneet merkittävästi harvennustavoittain. Tutkimusleimikoiden vaurioprosentit olivat 5,0, 4,6 ja 5,7.

Pieniä hakkuukoneita on Ruotsissa käytetty enemmän kuin Suomessa. Brunberg & Nilsson (1988, s. 3) tutkivat FMG 0470 Lillebror -hakkuukonetta ensiharvennuksessa. Männiköissä vaurioprosentti vaihteli välillä 1,6 - 2,9 ja kuusikoissa 0,9 - 4,3. Vauriot keskittyivät metsäkuljetusurien välisten kapeiden hakkuu-urien varsille.

Sirénin (1990, s. 12, 20) tutkimuksessa oli mukana pieniä yksi- ja kaksiotehakkuukoneita. Tutkimusleimikoissa vaurioitui keskimäärin 5,0 % jäävästä puustosta, eikä konetyyppien välillä ollut eroa. Tutkimukseen sisältyi myös konetyyppejä vertaileva koe, jossa yksi- ja kaksiotehakkuukoneen työskentelyä seurattiin tiheässä kuusikossa. Vaurioprosentti yksiotehakkuukoneella oli keskimäärin 0,7, kaksiotehakkuukoneella vastaavasti 3,8. Vertailukokeen vauriomäärät eivät sisällä metsäkuljetusvaurioita.

Ryynänen (1993, s. 34, 1994, s. 57) tutki kuutta erilaista maataloustraktoriperustaista hakkuukonetta männikön ensiharvennuksessa. Puustovauriot inventoitiin ennen metsäkuljetusta. Vain puuaineeseen asti ulottuvat vauriot otettiin huomioon. Tutkimustyömailla vaurioitui 0,9 - 3,8 % jäävistä puista. Puustovauriot keskittyivät uran reunapuihin. Herkimmin puut vaurioituivat nila-aikana alkukesästä. Ruotsissa Gullberg & Johansson (1992) tutkivat Ford Versatile -traktoria varustettuna yksiotehakkuulaitteella. Tutkimuksessa rekisteröitiin pinta-alaltaan yli 15 cm^2 vauriot. Vauriopuiden osuus tutkimusleimikoissa oli keskimäärin 7,0 %.

Joukkokäsittelystä on haettu ratkaisua ensiharvennusten korkeisiin korjuukustannuksiin. Lilleberg (1991) tutki joukkokäsittelyn ja harvennustavan vaikutusta tuottavuuteen ja korjuujälkeen. Yksiotehakkuukonetta verrattiin männikön ensiharvennuksessa yksinpuin- ja joukkokäsittelyssä nila-aikana. Yksinpuinkäsittelyssä vaurioprosentti vaihteli tutkimuspalstoittain välillä 2,3 - 8,1, joukkokäsittelyssä vastaavasti välillä 3,9 - 5,5. Joukkokäsittely asettaa Lillebergin mukaan suuria vaatimuksia kuljettajan ammattitaidolle (Lilleberg 1991, s. 9 - 10).

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion mukaan harvennus on puustovaurioiden osalta erinomaisesti toteutettu, kun vaurioituneita puita on enintään 5 % jäävän puuston runkoluvusta. Korjuujälki täyttää puustovaurioiden osalta vähimmäisvaatimukset, jos jäävistä puista korkeintaan 9 % on vaurioituneita ja enintään 5 % vakavasti vaurioituneita (Hartikainen 1993). Pinta-alaltaan yli 100 cm^2:n vauriot ja syvävauriot katsotaan vakaviksi vaurioiksi.

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio on seurannut korjuutyön laatua vuodesta 1990 lähtien. Vuonna 1993 Tapio siirtyi käyttämään koealamittauksiin perustuvaa menetelmää, joten tuloksia vuodesta 1993 lähtien ei voida suoraan verrata aiempiin vuosiin. Keskimääräiset vaurioprosentit ja tarkastettujen konehakkuuleimikoiden määrä ovat olleet seuraavat (Harvennushakkuiden...1990, Hartikainen 1991, 1992, 1993 ja 1994, 1995 ja 1996):

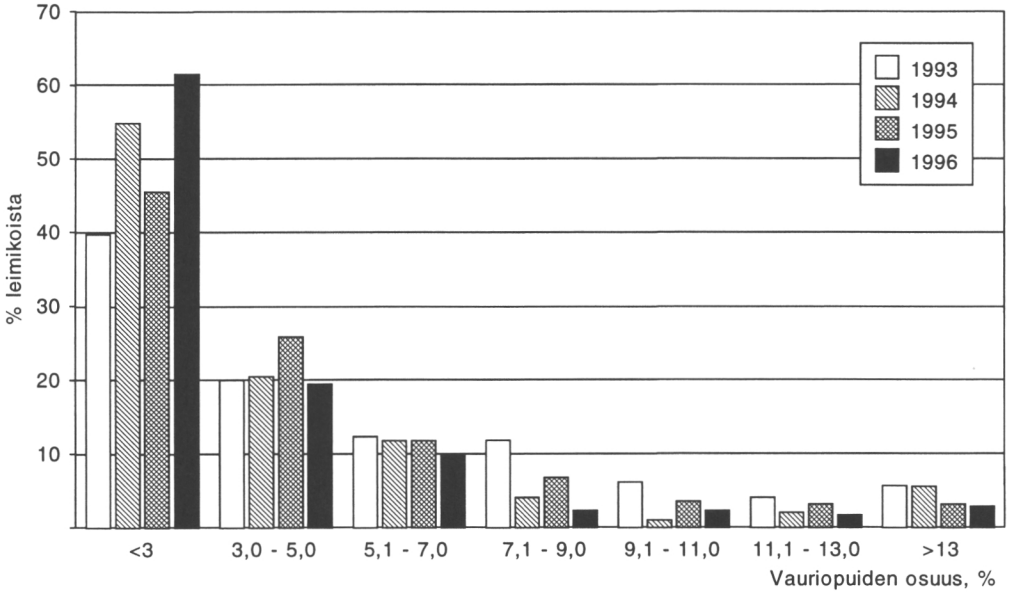
Vuosi	Vaurio-%	Leimikoiden lukumäärä
1990	2,5	178
1991	2,2	157
1992	1,6	197
1993*	5,1	195
1994*	3,9	195
1995*	4,1	220
1996*	3,4	174

*uusi mittausmenetelmä

Vaikka vaurioprosentit ovat olleet keskimäärin kohtuullisia, vauriomäärien leimikoittainen vaihtelu on kuitenkin suurta. Kuvassa 3 esitetään vuosina 1993 - 1996 inventoitujen konehakkuuleimikoiden jakautuminen vauriomäärä-luokkiin (Hartikainen 1996).

2.5.3 Puustovaurioiden koko, laatu, sijainti ja aiheuttaja

Vaurion seurausvaikutukset ovat sidoksissa vaurion sijaintiin, kokoon ja laatuun. Juurivaurioista on Pohjoismaissa rekisteröity yleensä vain läpimitaltaan vähintään 2 cm paksuissa juurissa korkeintaan 70 cm:n etäisyydellä juurenniskasta



Kuva 3. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion vuosina 1993 - 1996 inventoimien konehakkuuleimikoiden jakautuminen vauriomäärä-luokkiin (Hartikainen 1996).

sijaitsevat vauriot. Perusteena edelliselle ovat Nilssonin (1965, s. 394) ja Nilssonin & Hyppelin (1968, s. 684, 693 - 696) tutkimustulokset, joiden mukaan yli 70 cm:n etäisyydellä rungosta juurivauriot eivät aiheuta kuusen lahoutumista. Juuristovaurioista voi kuitenkin seurata kasvutappioita, vaikka vauriot sijaitsisivatkin yli 100 cm:n etäisyydellä juurenniskasta (Wästerlund 1983, s. 106). Tuloksia metsäkuljetusvaurioiden sijainnista ja laadusta esitetään taulukossa 1.

Metsäkuljetusvauriot keskittyvät uran varteen ja sijaitsevat yleensä alhaalla rungossa. Sirénin (1981, s. 11 - 14) tutkimuksessa lähes 90 % vauriopuista sijaitsi alle 2,5 m:n etäisyydellä uran keskeltä ja runkovaurioiden keskimääräinen etäisyys juurenniskasta oli 1 m. Metsätraktorin kone-elimistä eniten runkovaurioita aiheuttivat pyörä, pankko, kuormain ja ajoneuvon runko. Noin 15 % syvävaurioista oli pinta-alaltaan yli 500 cm^2. Yleensä suurin osa vakavista vaurioista syntyy metsäkuljetuksessa. Frödingin (1992a, s. 30) tutkimuksessa yli 90 % vaurioista sijaitsi alle 2 m:n korkeudella rungossa.

Koneellisen hakkuun vauriokuva poikkeaa metsäkuljetuksen vastaavasta. Hakkuuvaiheessa syntyy pääosin pienikokoisia pintavaurioita, jotka saattavat sijaita korkeallakin rungoissa. Esimerkiksi Tapion korjuujälkiselvityksessä vuonna 1996 (Hartikainen 1996) 80 % konehakkuuleimikoiden vaurioista oli kooltaan alle 100 cm^2.

Sirénin (1990, s. 12 - 13) tutkimuksessa pienten hakkuukoneiden aiheuttamista vaurioista sijaitsi rungossa 86,7 %, juurenniskassa 7,7 % ja juuristossa 5,6 %. Vaurioista 85 % oli pintavaurioita ja 15 % syvävaurioita. Yli 90 % vaurioista oli kooltaan alle 100 cm^2.

Taulukko 1. Tutkimustuloksia metsäkuljetusvaurioiden sijainnista ja laadusta.

Lähdeviite	Vaurion sijainti, % vaurioista			Vaurion laatu, % vaurioista		Alle 100 cm^2:n vaurioiden osuus laatuluokittain	
	Runko	Juuren-niska	Juuri	Pinta-vaurio	Syvä-vaurio	Pinta-vaurio	Syvä-vaurio
Sirén (1981)	55,0	8,2	36,8	37,5	62,5	69,9	45,5
Högnäs (1982)*	81,5		18,5	27,0	73,0	62,0	62,0
Fröding (1982)*	68,0		32,0	86,0	14,0	48,3	54,5
Fröding (1992a)*	78,4		21,6	37,0	63,0	91,9	52,4

*Juurenniska- ja juurivaurioita ei eritelty

Frödingin (1992a, s. 38) tutkimuksessa hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjun aiheuttamista vaurioista 46 % oli pintavaurioita ja 54 % syvävaurioita. Pintavaurioista 67 % ja syvävaurioista 59 % oli kooltaan alle 100 cm^2. Vastaavasti Sauterin (1995, s. 73) tutkimuksessa vaurioista alle 10 % oli kooltaan yli 50 cm^2. Lagesonin (1996, s. 7) tutkimuksessa hakkuukoneen aiheuttamista vaurioista lähes 75 % oli kooltaan alle 100 cm^2. Kaksi kolmannesta vaurioista sijaitsi alle 2 m:n korkeudella juurenniskasta. Vaurioista lähes 90 % oli pintavaurioita.

Jälkikäteen tehdyissä inventoinneissa päätelmät vaurion aiheuttajasta ja työvaiheesta ovat arvionvaraisia. Imposen & Sirénin (1983, s. 11) tutkimuksessa yksioteprosessorin vaurioista 61 % arvioitiin hakkuulaitteen ja kolmannes käsiteltävän puun aiheuttamiksi. Fröding (1992a, s. 39) arvioi hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjun puustovaurioista 40 % syntyneen metsäkuljetuksessa ja 60 % hakkuuvaiheessa. Hakkuuvaiheen vaurioista 90 % Fröding (1992a, s. 38) kohdensi puun karsintaan ja katkontaan ja 10 % puun kaatoon.

Vaurioiden tutkimusta on jonkin verran tehty työn tapahtumahetkellä. Nilsson (1985) seurasi metsätraktorin kuormauksessa syntyvien kosketusten ja vaurioiden määrää. Kosketusten määrä lisääntyi puuston tiheyden kasvaessa. Lähes 80 % kosketuksista aiheutti kuormattava taakka. Tutkimuksessa rekisteröidyistä 195 kosketuksesta 16 % johti vaurioitumiseen.

Sirén (1990, s. 20) seurasi pystypuihin syntyviä kosketuksia ja niistä syntyviä vaurioita vertaillessaan pieniä hakkuukoneita kuusikon ensiharvennuksessa. Tutkimus tehtiin talviaikana. Tutkimuksessa rekisteröidyistä 74 kosketuksesta 42 % aiheutti vaurion. Käsiteltävä puu ja kuormain olivat yleisimmät vaurion aiheuttajat.

Athanassiadis (1997, s. 464) seurasi vaurioiden syntyä työn tapahtumahetkellä kahdella tutkimusleimikolla. Hakkuukoneena oli maataloustraktoriperustainen hakkuukone. Ensiharvennuskuusikossa vaurioprosentti oli 6,3, myöhemmässä harvennuksessa vastaavasti 6,5. Vaurioista kaksi kolmasosaa syntyi puuta kaadettaessa ja käsiteltäessä, vajaa viidennes hakkuulaitteen viennissä puulle siirtymisten osuuden ollessa vajaa kymmenys vaurioista. Yli 90 % vaurioista oli runkovaurioita, ja 65 % vaurioista oli pinta-alaltaan alle 50 cm^2.

Tapahtuma-aikaista puustovaurioiden tutkimusta tekivät myös Harstela & Maukonen (1983, s. 108) verratessaan yksi- ja kaksioteprosessorin työskentelyä pienoissimulaattorilla. Simulaattorikokeessa vaurio katsottiin syntyneeksi käsiteltävän puun tai koneen osan koskettaessa pystypuuta. Simulaattorikokeessa vaurioitui työtavasta ja -oloista riippuen 17,7 - 38,5 % jäävästä puustosta. Valtaosa vaurioista aiheutui puita käsiteltäessä.

2.5.4 Ajourat ja urapainumat

Ajouraleveyden mittaustulokset riippuvat mittausmenetelmästä. Ajouraväliä mitataan usein linjoittaisella mittausmenetelmällä, joka Lillebergin (1984, s. 6) mukaan antaa yliarvion ajouravälistä. Todellinen ajouraväli saadaan mittaamalla ajourien kokonaispituus leimikolla, jolloin myös yhdysurat tulevat otetuiksi mukaan.

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion korjuujälkivaatimusten mukaan ajouravälin on oltava vähintään 20 m, ja uraleveys SLU-menetelmällä (liite 2, s.171) mitattuna saa olla enintään 4,5 m. Tapion ohjeiden mukaan uraleveys mitataan ainoastaan runkoluvun ollessa yli 600 runkoa/ha. Painumien osalta korjuujälki luokitellaan hyväksi, jos yli 10 cm:n painumia on enintään 5 %:lla ajourien kokonaispituudesta leimikolla. Painumia saa olla enintään 10 %:lla vähimmäisvaatimusten täyttämiseksi (Hartikainen 1993).

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion korjuujälkiselvityksissä uraleveydet ja uravälit ovat koneellisessa hakkuussa olleet seuraavat (Harvennushakkuiden... 1990, Hartikainen 1991, 1992, 1993, 1994, 1995, 1996):

Vuosi	Ajouraleveys, m (SLU-menetelmä)	Ajouraväli, m
1990	3,5 *	24,1
1991	3,7 *	22,6
1992	3,7 *	22,5
1993	4,2	22,8
1994	4,2	22,5
1995	4,1	22,7
1996	4,1	23,4

*Ajouraleveys mitattu Kniggle-menetelmällä (Diggle & Knutell 1979).

Ajourapainumia on mitattu painuman keskimääräisenä syvyytenä tai yli 10 cm syvyisen painuman määränä joko prosenttiosuutena ajourien määrästä tai pituutena hehtaarilla. Yli 10 cm syvyisen painuman mittaaminen pohjautuu tutkimustuloksiin, joiden mukaan yli 10 cm:n painumasta seuraa vakavia maaperä- ja juuristovaurioita. Koska myös matalat painumat ja maaperän tiivistyminen voivat aiheuttaa kasvun menetyksiä (Olsson 1977, Wästerlund 1985, s. 179 - 183, 1986a, s. 58 - 59, 1988, s. 264 - 271, 1989, s. 26 - 27, 1990, 1992, s. 137), keskimääräinen raiteiden syvyys lienee parempi kriteeri seurausvaikutuksia arvioitaessa.

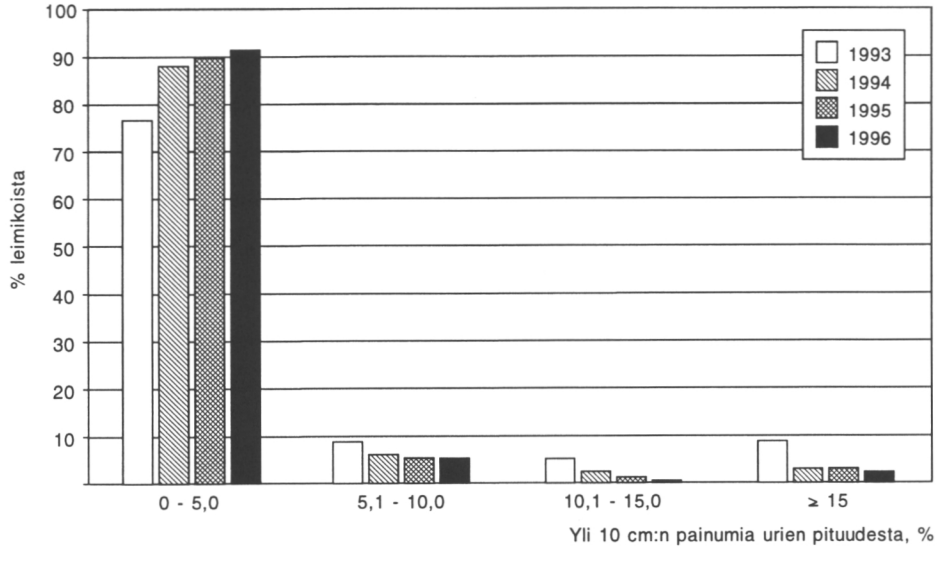
Högnäsin (1982, s. 33, 38, 43) korjuujälki-inventoinnissa ajourapainuman syvyys luokiteltiin kolmeen luokkaan. Painuman syvyys oli alle 5 cm 94,7 %:lla, 6 - 10 cm 3,8 %:lla ja yli 10 cm 1,5 %:lla koealoista. Lilleberg (1986, s.

3) mittasi yli 10 cm painuman määrää. Keskikokoinen metsätraktori oli aiheuttanut keskimäärin 14 m, pieni metsätraktori 30 m ja telamaasturi 62 m yli 10 cm:n syvyisiä painumia hehtaarilla. Konetyyppien tulokset eivät ole kuitenkaan suoraan vertailukelpoisia, koska telamaastureita käytetään pääasiassa heikosti kantavilla turvemailla.

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion vuosina 1993 - 1996 inventoimien konehakkuuleimikoiden jakautumista luokkiin mitattaessa yli 10 cm syvän painuman osuutta ajourien kokonaispituudesta esittää kuva 4 (Hartikainen 1996).

Ruotsissa ajourapainumia on mitattu painuman keskimääräisenä syvyytenä. Vuonna 1978 keskimääräinen painuman syvyys oli 7,9 cm ja vuonna 1979 vastaavasti 6,5 cm (Eriksson 1981, s. 16). Frödingin (1992b, s. 20) tutkimuksessa raiteiden keskimääräiset syvyydet korjuumenetelmittäin olivat seuraavat:

Hakkuumenetelmä	Keskimääräinen raiteen syvyys, cm
Moottorisahahakkuu	3,2
Prosessori	2,6
Yksiotehakkuukone	2,8
Osapuumenetelmä	6,4



Kuva 4. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion vuosina 1993 - 1996 inventoimien konehakkuuleimikoiden jakautuminen luokkiin mitattaessa yli 10 cm syvän painuman osuutta ajourien kokonaispituudesta (Hartikainen 1996).

Suomessa Metsäntutkimuslaitos on ruotsalaisten tavoin mitannut keskimääräistä painuman syvyyttä. Yksioteprosessorileimikoissa keskimääräinen painuma oli kesällä korjatuissa leimikoissa 6,4 cm ja talvileimikoissa 0,4 cm (Sirén 1982). Koko- ja osapuuna korjatuissa leimikoissa painuman syvyys oli keskimäärin 3,2 cm (Sirén 1986a). Pienet tela-alustaiset hakkuukoneet aiheuttivat Sirénin (1990) tutkimuksessa keskimäärin 1,9 cm:n painumat. Leimikoissa, joissa myös metsäkuljetus tehtiin pienillä telakoneilla, painuman syvyys oli keskimäärin 6,7 cm.

Konetyyppien suora vertailu inventointitulosten perusteella ei ole mahdollista erilaisten käyttöolojen vuoksi. Järjestetyt kokeet antavat mahdollisuuden koneiden vertailuun. Järjestetyillä kokeilla raiteenmuodostusta ovat tutkineet mm. Hallonborg (1983), Högnäs (1985), Sondell (1986), Sirén ym. (1987) sekä Karlsson & Myhrman (1990a, 1990b). Leimaa-antavana tuloksena on koneiden kehitys maastoystävällisempään suuntaan.

2.5.5 Poistuman määrä, laatu ja jakautuminen

Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio määrittelee metsänhoitosuosituksissaan (Metsänhoitosuositukset 1989, s. 33) kasvatushakkuiden tavoitteet seuraavasti: "Kasvatushakkuissa poistetaan vioittuneet, huonolaatuiset sekä metsikön kehityksessä jälkeenjääneet puut samoin kuin hyvälaatuisen valtapuuston kasvua haitanneet puut. Kasvamaan jätetään kullekin kasvupaikalle sopivia, kasvukykyisiä ja paraslaatuisia puita niin paljon, että maan tuottokyky tulee mahdollisimman tehokkaasti hyväksi käytetyksi huomioon ottaen puiden järeyskehityksen vaatima riittävä kasvutila. Kasvatettavan puuston tulee säilyä kasvatushakkuissa sekä rungoiltaan että juuristoiltaan vahingoittumattomana".

Puulajeittain ja metsätyypeittäin laaditut harvennusmallit osoittavat valtapituuden ja pohjapinta-alan avulla metsikön harvennustarpeen ja hakkuun jälkeisen kasvatettavan puuston määrän. Alle 14 m:n valtapituudella puuston määrän tunnuksena käytetään runkolukua (Metsänhoitosuositukset 1989, s. 34).

Poistettavat puut valitsee nykyään hakkuukoneen kuljettaja tai metsuri. Hakkuukoneen kuljettajan työtä helpottamaan Niemistö (1992) on laatinut keskiläpimittaan ja runkolukuun perustuvat harvennusmallit. Mallit on esitetty erikseen koko metsikölle ja ajourien väliselle alueelle käytettäessä 20 tai 30 m uraväliä ja 4 m:n uraleveyttä.

Hakkuukoneen kuljettaja näkee koneen mittalaitteesta poistamiensa puiden läpimitat ja saa hyvän kuvan harvennettavan alueen puuston järeydestä. Jäävän puuston määrää hän pystyy kontrolloimaan laskemalla jäävien puiden lukumäärän hakkuukoneen puomin ulottuvuuden avulla rajattavalta puoliympyrältä. Puiden keskiläpimitan ja puoliympyrän sisään jäävien puiden

lukumäärän perusteella kuljettaja pääsee suositusten mukaiseen jäävän puuston määrään.

Poistettavien puiden valinnan siirtyessä metsureille 1980-luvulla Lilleberg (1986, s. 2) vertaili metsurien tekemää ja ennakkoon tehtyä leimausta. Metsurien leimaustulos kesti vertailun työnjohdon tekemän leimauksen kanssa. Kustannussäästöjen lisäksi leimauksen siirtäminen metsureille monipuolisti hakkuun työnkuvaa ja lisäsi työn mielekkyyttä.

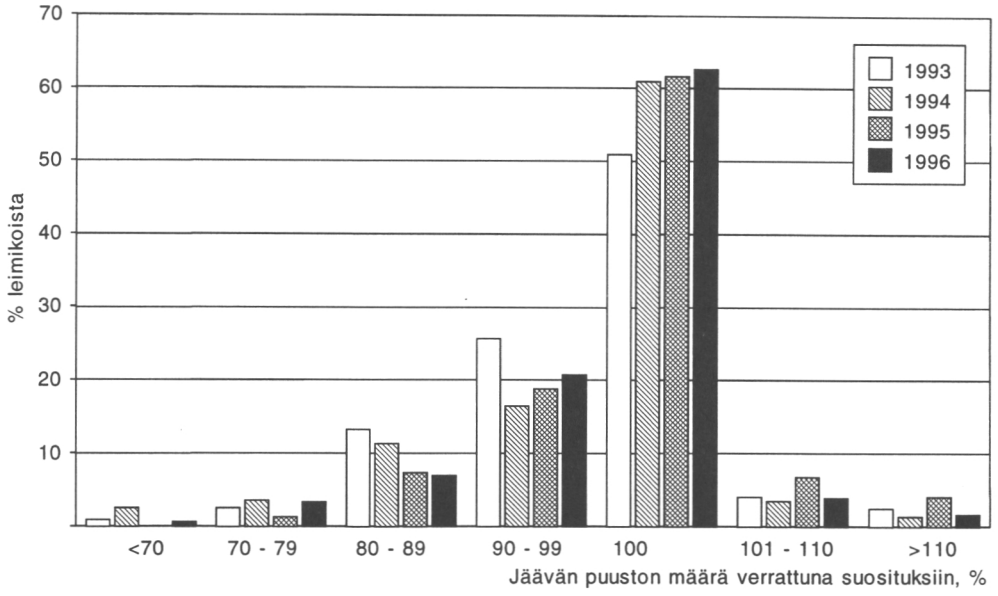
Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio on korjuujälkiselvityksissään seurannut jäävän puuston määrää. Vuosina 1993 - 1996 inventoidut konehakkuuleimikot jakautuivat luokkiin kuvan 5 mukaisesti verrattaessa jäävän puuston määrää suosituksiin (Hartikainen 1996).

Fröding (1992b) selvitti tutkimuksessaan harvennuksessa poistettujen ja jäävien puiden läpimittojen suhdetta eri korjuumenetelmissä. Välillä 0,5 - 0,9 olevat suhdeluvut osoittavat kyseessä olleen alaharvennuksen. Suhdeluvun ollessa yli 1,0 kyseessä on yläharvennus. Eri hakkuutavoissa suhdeluvut olivat seuraavat (Fröding 1992b, s. 16):

	Moottorisaha-hakkuu	Prosessori	Yksiote-hakkuukone	Osapuu-menetelmä
	Poistettujen ja jäävien puiden läpimittojen suhde			
Ensiharvennukset	0,79	0,74	0,74	0,73
Muut harvennukset	0,67	0,72	0,77	

Suhdeluvut osoittavat harvennuksen olleen selvästi alaharvennusta kaikissa hakkuutavoissa. Hakkuumenetelmien väliset erot olivat verraten pieniä.

Jäävän puuston määrän ja laadun lisäksi myös puuston jakautumiseen leimikolla on kiinnitettävä huomiota. Ajourien reunoille tulisi jäädä riittävä ja vaurioitumaton puusto ajourien kasvutilaa hyödyntämään. Ajourien reunapuilla on käytettävissään muuta puustoa runsaammin valoa, kasvutilaa ja hakkuutähteistä vapautuvia ravinteita. Isomäen & Niemistön (1990, s. 17) tutkimuksessa reunapuut kasvoivat keskimäärin 20 % enemmän kuin ajourien välisen vertailuvyöhykkeen puut. Reunapuiden lisäkasvu oli suurimmillaan viidentenä kasvukautena ajourien avaamisesta ja kasvun lisäys säilyi 10 vuoden tutkimusjakson loppuun saakka. Käytäväharvennuksissa yksittäisillä reunapuilla on havaittu jopa 40 %:n kasvunlisäyksiä. Kuusella reunavaikutuksen aiheuttama kasvunlisäys on jonkin verran suurempi kuin männyllä (Isomäki 1986, s. 27).



Kuva 5. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion vuosina 1993 - 1996 inventoimien konehakkuuleimikoiden jakautuminen luokkiin verrattaessa jäävän puuston määrää suosituksiin (Hartikainen 1996).

Reunavaikutusta ilmenee myös kauempana ajourista sijaitsevilla taustavyöhykkeen puilla. Isomäen & Niemistön (1990, s. 17) tutkimuksessa taustavyöhykkeen puilla tarkoitettiin puita, jotka sijaitsivat reunapuiden takana kolmen metrin vyöhykkeellä ajouran reunasta. Nämä puut saavuttivat 7 % lisäkasvun seitsemäntenä kasvukautena harvennuksen jälkeen. Buchtin (1981, s. 93) tutkimuksessa reunapuiden takana 2 - 4 metrin etäisyydellä ajouran reunasta sijaitsevien taustapuiden kasvunlisäys oli männyllä 15 %, ja vielä 4 - 6 metrin etäisyydelläkin lähes 3 %.

Useissa muissakin tutkimuksissa ajouran reunavaikutuksen ulottuvuudesta on saatu samansuuntaisia tuloksia. Fries (1976, s. 34) totesi vaikutusalueeksi 4 - 6 m, Bucht & Elfving (1977, s. 334 - 339) 3 m, Eriksson (1982, s. 54) 3 m ja Niemistö (1989, s. 208) 3 m. Isomäen (1986, s. 28) mukaan reunavaikutus ulottuu puihin, joilla on välitön juuristo- tai latvustoyhteys ajouratilaan. Reunavaikutuksen tarkasta kestoajasta ei lyhyiden tutkimusjaksojen takia ole tarkkaa tietoa. Isomäen & Niemistön (1990, s. 34) tutkimuksessa reunavaikutuksen maksimi saavutettiin 5 - 7 vuodessa eikä vaikutuksen tason laskusta ollut merkkejä vielä vanhimpienkaan (11 vuotta vanhojen) ajourien kohdalla.

Koska reunavaikutus kompensoi ajouran aiheuttamia kasvutappioita, ajouran reunapuusto olisikin jätettävä muuta puustoa tiheämmäksi (Isomäki & Niemistö

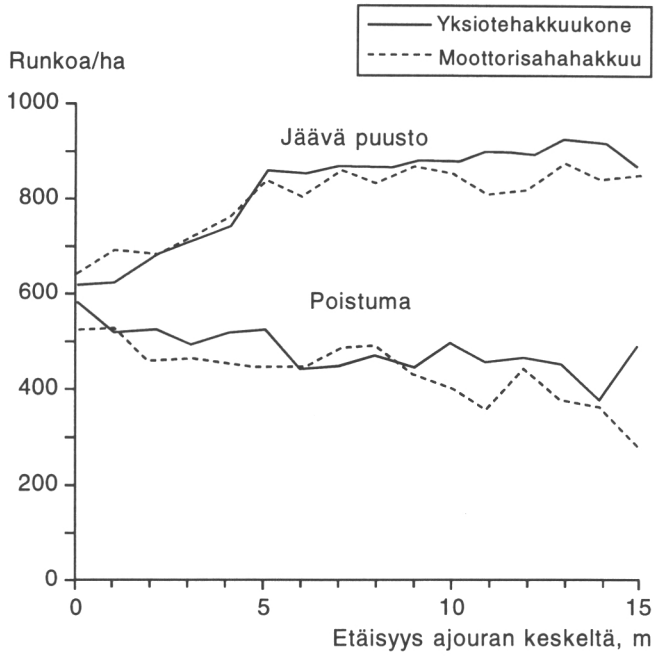
1990, s. 25 - 27). Näin myös yleensä tehdään. Lillebergin (1984, s. 7) tutkimuksessa runkoluku oli ajouran reunassa 20 % suurempi kuin 4 metrin etäisyydellä ajouran keskeltä. Vastaavia tuloksia sai Fröding (1982, s. 22) verratessaan runkolukua harvennuksen jälkeen eri etäisyyksillä korjuukoneen raiteista. Kun viiden metrin etäisyydellä raiteista suhteellinen runkoluku oli 100, 0 - 1 m:n etäisyydellä raiteista suhdeluku oli 178, 1 - 2 m:n etäisyydellä 130 ja 2 - 5 m:n etäisyydellä 127.

Frödingin (1992b, s. 17) tutkimuksessa poistuman ja jäävän puuston määrät jakautuivat miestyö- ja hakkuukoneleimikoissa kuvan 6 mukaisesti. Vielä etäisyysluokassa 7 m olevat koealat ulottuvat ajoura-alueelle asti. Kuvan 6 mukaan jäävän puuston määrä on kuitenkin verraten tasainen etäisyysluokasta 5 lähtien. Tulos viittaa siihen, että ajourien reunoille on jätetty keskimääräistä enemmän puita, ja harvennustulos tässä suhteessa on onnistunut. Moottorisahahakkuussa jäävän puuston jakautuminen on ollut hieman tasaisempi kuin hakkuukoneleimikoissa.

Ajourien takia menetettävien kasvatettavaan jaksoon kuuluvien puiden määrää voidaan vähentää ajourien suuntaamisella. Hyvin suunnitellussa leimikossa ajourat eivät ole sattumanvaraisesti avattuja käytäviä. Ruotsissa Dahlin (1980) tutki simuloimalla mahdollisuutta säästää kasvatettavaksi tarkoitettavaa puustoa ajouria mutkittelemalla. Erityisen kannattavaa tällainen ajourien suuntaaminen oli puustoltaan epätasaisissa leimikoissa. Tutkimuksen mukaan mutkittelemalla voidaan säästää 30 - 80 % muutoin ajourilla olevista päävaltapuista ja lisätä 10 % päävaltapuiden määrää harvennuksen jälkeen (Dahlin 1980, s. 18).

Thor & Frohm (1997, s. 2 - 3) selvittivät uravälin vaikutusta harvennuksessa menetettävien, kasvatettavaan jaksoon kuuluvien puiden määrään. Hakkuu tehtiin keskikokoisella yksiotehakkuukoneella uravälien ollessa 18 m ja 28 m. Käytettäessä 28 m:n uraväliä hakkuukone avasi metsäkuljetusurien väliin hakkuu-uran. Uravälin vaikutus menetettyjen puiden määrään oli vähäinen. Männikössä menetettiin kasvatettavista puista 18 % käytettäessä 18 m:n uraväliä ja 16 % uravälin ollessa 28 m. Kuusikossa vastaavat menetettyjen puiden osuudet olivat 29 % ja 26 %.

Männikössä hakkuu-uran käyttö ei alentanut työn tuottavuutta, mutta kuusikossa tuottavuus aleni 20 % käytettäessä pidempää ajouraväliä ja hakkuuuraa. Syynä tuottavuuden alenemiseen olivat mm. näkyvyysongelmat. Thor & Frohm (1997, s. 4) näkevät pidemmän ajouravälin ja hakkuu-uran käytön järkeväksi ainoastaan männiköissä, joista on odotettavissa laadukasta sahapuuta tai joissa puiden laatu vaihtelee paljon.



Kuva 6. Poistuman ja jäävän puuston määrät eri etäisyyksillä ajourista. Etäisyysluokka 0 käsittää 5,64 m:n ympyräkoealat, joiden keskipiste sijaitsee 0,0 - 0,5 m:n etäisyydellä uran keskeltä. Etäisyysluokissa 0 - 4 m on mukana ajouran vaikutus. (Fröding 1992b, s. 17).

2.6 Korjuujälki muissa maissa

Tavaralajimenetelmän käyttö on levinnyt Pohjoismaiden ulkopuolelle harvennusten yleistymisen myötä, ja vertailuja tavaralajimenetelmän ja erilaisten pitkän puun korjuumenetelmien korjuujäljestä on tehty eri puolella maailmaa. Sauter (1995, s. 72) vertaili hakkuukone-metsätraktori korjuuketjun (tavaralajimenetelmä) ja hakkuukone-pihtijuontotraktori korjuuketjun (rankamenetelmä) korjuujälkeä Saksassa. Puustovaurioihin luettiin mukaan yli 10 cm^2:n vauriot. Tavaralajimenetelmää käytettäessä vaurioitui keskimäärin 12,9 % ja rankamenetelmässä 14,6 % jäävästä puustosta. Suurin ero menetelmien välillä oli metsänhoidollisesti arvokkaiden, "tulevaisuuden" puiden, vaurioitumisessa. Näistä vaurioitui tavaralajimenetelmällä 3,7 %, rankamenetelmällä vastaavasti 9,1 %.

Bort (1994, s. 114) tutki ajouravälin vaikutusta korjuun tuottavuuteen ja jäävän puuston vaurioitumiseen Saksassa. Käytettäessä 20 m:n uraväliä hakkuu tehtiin

yksiotehakkuukoneella ja metsäkuljetus kuormatraktorilla. Käytettäessä 30 m:n uraväliä urien keskivyöhykkeen puut kaadettiin moottorisahalla hakkuukoneen tehdessä karsinnan ja katkonnan, 40 m:n uravälillä hakkuukoneen ulottumattomissa olevat puut kaadettiin moottorisahalla ja vinssattiin hakkuukoneen ulottuville. Käytettäessä 20 m:n uraväliä vaurioitui 3,4 % jäävästä puustosta, 30 m:n uravälillä 6,8 % ja 40 m:n uravälillä vastaavasti 10,6 %. Ajouravälin kasvaessa myös korjuun kokonaiskustannukset kasvoivat huomattavasti.

Puolassa Suwala (1997, s. 222 - 223) vertaili rankamenetelmän ja tavaralajimenetelmän eri vaihtoehtoja ja selvitti samalla ajouravälin vaikutusta korjuujälkeen harvennusmänniköissä. Vauriopuiden, pintavaurioiden sekä alle 100 cm^2:n vaurioiden osuudet eri ajouraväleillä ja korjuumenetelmillä esitetään taulukossa 2.

Mielenkiintoinen tulos Suwalan (1997) tutkimuksessa oli vauriomäärien lisääntyminen ajouravälin kasvaessa. Tavaralajimenetelmän ja rankamenetelmän erot vauriomäärissä ja vaurioiden laadussa olivat selvät.

Erilaiset Pohjois-Amerikassa käytetyt pitkän puun pihti- ja vaijerijuontomenetelmät soveltuvat huonosti harvennuksiin. Aho ym. (1983) totesivat harvennuksessa vaurioituvan 22 - 50 % jäävästä puustosta. Nichols ym. (1994, s. 353) vertailivat kaato-kasauskone-pihtijuontotraktori korjuuketjua ja korjuuketjua, jossa kaato tehtiin miestyönä ja metsäkuljetus vaijerijuontotraktorilla lehtipuumetsiköiden harvennuksessa. Vauriopuiden osuudet tutkimus-

Taulukko 2. Korjuumenetelmän ja ajouravälin vaikutus puustovaurioiden määrään ja laatuun Puolassa (Suwala 1997, s. 222 - 223).

Korjuumenetelmä	Uraväli, m			Pintavaurioiden osuus, %	Vaurioista <100 cm^2 %
	22	40	60		
	Vauriopuiden osuus, %				
Rankamenetelmä:					
Moottorisahahakkuu - hevonen		2,0	2,4	90	72
Moottorisahahakkuu - laahusjuontotraktori		5,7	11,6	75	68
Yksiotehakkuukone - laahusjuontotraktori	2,4	3,4	4,0	79	55
Tavaralajimenetelmä:					
Moottorisahahakkuu - kuormatraktori		1,3	1,9	94	55
Yksiotehakkuukone - kuormatraktori	0,2	0,6	1,8	100	51

leimikoissa vaihtelivat edellisessä menetelmässä 20 - 31 % ja jälkimmäisessä 22 - 44 %. Meadows (1993, s. 253) totesi vastaavasti lehtipuumetsikön harvennuksessa peräti 62 % jäävästä puustosta vaurioituneen.

Ostrofsky ym. (1986, s. 1240) selvittivät, missä työvaiheessa vauriot syntyvät pitkän puun korjuumenetelmiä käytettäessä. Yli 60 % vaurioista syntyi puita kaadettaessa ja kasattaessa juonnon osuuden ollessa keskimäärin 29 % vaurioista. Juontourien reunapuut olivat erityisen alttiita vaurioille.

Tavaralajimenetelmän käyttö on yleistymässä myös Pohjois-Amerikassa. Bettinger & Kellogg (1993) tutkivat hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjun korjuujälkeä Oregonissa. Tutkimusalueen lähtöpuusto oli 1327 runkoa/ha ja jäävä puusto 428 runkoa/ha poistettujen runkojen keskiläpimitan ollessa 20,8 cm. Olosuhteet eivät siis poikenneet kovin paljon suomalaisista harvennusoloista. Korjuu tehtiin alkukesällä, jolloin puut ovat herkkiä vaurioitumiselle. Uraväli oli keskimäärin 15,2 m.

Puustovauriot mitattiin 0,04 ha:n koealoilta, joiden osuus oli 25 % leimikon pinta-alasta. Juurivaurioita ei inventoitu. Tutkimusleimikolla oli vaurioitunut 39,8 % jäävistä puista vaurioiden keskikoon ollessa kuusella 118 cm^2 ja hemlokilla 59,9 cm^2. Vaurio luokiteltiin erittäin pahaksi vaurion pinta-alan ollessa yli 100 neliötuumaa (645 cm^2). Erittäin pahasti vaurioitui korjuussa 0,8 % jäävästä puustosta. Valtaosa vaurioita sijaitsi alle 5 m:n etäisyydellä ajourista ja alle metrin korkeudella rungoissa. Vaikka tutkimusleimikon vauriomäärät olivat korkeita, Bettinger & Kellogg (1993, s. 63) totesivat vauriomäärien olleen pienempiä kuin harvennettaessa vastaavia leimikoita vinssaamalla tai kaato-kasauskone-juontotraktori korjuuketjulla.

Lanford & Stokes (1995, s. 78) vertailivat kaato-kasauskone-pihtijuontotraktori korjuuketjua ja hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjua istutusmännikön harvennuksessa Alabamassa. Korjuujälkeä mitattiin 100 m^2:n koealoilta. Kaato-kasauskone-pihtijuontotraktori korjuuketju vaurioitti keskimäärin 62 puuta/ha. Vaurioiden keskikoko oli 439 cm^2 ja puustovaurioiden kokonaispinta-ala oli 2,72 m^2/ha. Hakkuukone-kuormatraktori korjuuketju vaurioitti vastaavissa työoloissa keskimäärin 25 puuta/ha. Vaurioiden keskikoko oli 45 cm^2 ja vaurioiden kokonaispinta-ala 0,11 m^2/ha.

Vertailussa valikoiva harvennus onnistui tavaralajimenetelmällä selkeästi pitkän puun menetelmää paremmin. Kaato-kasauskone-pihtijuontokone korjuuketjulla jäävän puuston pohjapinta-ala jäi keskimäärin 2,3 m^2 alle tavoitteen, joka oli 17,2 m^2/ha. Sen sijaan hakkuukone-kuormatraktori ketju jäi tavoite-pohjapinta-alasta keskimäärin vain 0,9 m^2 (Lanford & Stokes 1995, s. 77)

Japanissa Yamada (1995, s. 80) tutki neljää erilaista hakkuukonetta kuudella tutkimusleimikolla lehtikuusen ja sugin harvennuksessa. Mukana kokeessa oli sekä pyörä- että tela-alustaisia koneita. Tutkimusleimikoiden vaurioprosentit olivat välillä 0,8 - 28,3. Maaston kaltevuus lisäsi vauriomääriä. Valikoivassa harvennuksessa vauriomäärät olivat korkeampia kuin riviharvennuksessa. Tavaralajimenetelmää käytettäessä vauriomäärät olivat pienempiä kuin rankamenetelmässä. Tavaralajimenetelmän metsänhoidolliset edut erilaisiin pitkän puun korjuumenetelmiin verrattuna ovat Pohjois-Amerikassa todenneet myös Makkonen (1989, s. 2), Mcneel & Ballard (1992) ja Gingras (1994, s. 7-11) sekä Latviassa Epalts (1990, s. 18).

2.7 Korjuujälkeen vaikuttavat tekijät

2.7.1 Korjuumenetelmä

Seuraavassa koostetaan osin edellä esitettyihin korjuujälkituloksiin perustuen yhteen tekijöitä, joilla saattaa olla vaikutusta korjuujälkeen. Samalla luodaan viitekehystä tutkimushypoteeseille.

Pohjoismaisen tavaralajimenetelmän ja erilaisten pitkän puun korjuumenetelmien välillä on selvä tasoero sekä puusto- että maaperävaurioiden määrässä ja laadussa. Kun pohjoismaisissa tutkimuksissa raportoidaan koneellisessa hakkuussa tavaralajimenetelmällä vauriopuiden osuudeksi keskimäärin noin 5 %, liikkuvat pohjois-amerikkalaisissa tutkimuksissa erilaisissa pitkän puun korjuumenetelmissä todetut vauriopuiden osuudet kymmenissä prosenteissa.

Samansuuntaisia eroja menetelmien välillä on todettavissa myös maaperävaurioissa. Suomessakin koneellistaminen aloitettiin runkomenetelmää ja laahusjuontoa käyttäen. Pitkän puun korjuumenetelmät todettiin sopimattomiksi suomalaiseen metsätalouteen, jonka tavoitteena on laadukkaan sahapuun tuottaminen toistuvin harvennuksin. Toki muutkin kuin korjuujälkisyyt johtivat kehitystä tavaralajimenetelmään.

Tavaralajimenetelmän pitkän puun korjuumenetelmiä vähäisemmät maaperävauriot on todettu myös pohjois-amerikkalaisissa tutkimuksissa. Esimerkiksi Lanfordin & Stokesin (1995, s. 78) korjuumenetelmävertailussa kaato-kasauskone-pihtijuontotraktori korjuuketju aiheutti selvästi enemmän maaperävaurioita ja maaperän tiivistymistä kuin hakkuukone-kuormatraktori korjuuketju.

Syitä menetelmien välisiin eroihin on useita. Liikuteltaessa pitkiä puita tai puunosia puu-, runko- ja rankamenetelmissä jäävän puuston vaurioriski on suuri. Taakkoja maata pitkin vedettäessä pystypuiden juuret ja maaperä

vaurioituvat helposti. Kaato-kasauskoneita käytettäessä liikutaan paljon varsinaisten juontourien ulkopuolella. Vaurioriski on tällöin suuri, ja uramäärät nousevat suuriksi. Vinttureita käytettäessä tarvitaan verraten vähän leveitä juontouria, mutta puusto- ja maaperävaurioita syntyy helposti kapeiden vintturijuontourien varsille.

Tavaralajimenetelmän konekehittelyssä korjuun ympäristövaikutusten minimointi on ollut yksi keskeisistä tavoitteista. Kasvaneet metsäkonemarkkinat ovat mahdollistaneet mittavan tuotekehittelyn. Kuormatraktoreiden kantavuuden ja omapainon suhdetta on kyetty parantamaan, ja metsäkuljetuksen maaperävaurioiden määrää on kyetty vähentämään traktoreiden painojakaumaa, telirakenteita, voimansiirtoa, rengastusta ja teloja kehittämällä. Hakkuukoneissa on tapahtunut voimakasta kehitystä nostureissa ja automatiikassa. Sekä kuormatraktoreissa että hakkuukoneissa ergonomiaan on kiinnitetty erityistä huomiota. Koneiden hyvä ergonomia ja korkea tekninen käyttöaste antavat kuljettajalle mahdollisuuden tehokkaaseen ja ympäristön asettamat vaatimukset huomioon ottavaan työskentelyyn.

2.7.2 Työolot

Puuston määrä ennen ja jälkeen hakkuun, poistettavan puuston määrä, puiden koko, puulaji, maaston kaltevuus ja kantavuus sekä korjuun vuodenaika vaikuttavat korjuujälkeen. Jäävän puuston määrän lisääntyessä koneiden työtila pienenee ja vaurioitumiselle altistuvien puiden määrä kasvaa. Jäävän puuston määrän lisääntyminen kasvattaa yleensä vaurioiden määrää, mutta ei vastaavasti kuitenkaan vaurioprosenttia.

Poistuman määrä vaikuttaa hakkuussa ja metsäkuljetuksessa tehtävän työn määrään sekä koneiden käytössä olevaan työtilaan. Korjuujäljen syntyprosessissa puustovauriotilanne kehittyy korjuutyön edetessä. Osa vaurioituvista puista kuuluu harvennuksessa poistettaviin, osalla kasvatettavaan jaksoon kuuluvista vauriopuista saattaa olla lähistöllä korvaavia puita. Siten tällaisen vauriopuun poistaminen ei heikennäkään metsikön tilajärjestystä tai laatua.

Poistettavien puiden koko ja puulaji asettavat vaatimuksia käytettävälle korjuutekniikalle ja vaikuttavat myös korjuujälkeen. Suurikokoisten puiden hallittu kaato ja käsittely on vaikeampaa kuin pienempien puiden. Vaikeasti karsittavia puita saatetaan joutua liikuttelemaan enemmän kuin helposti karsittavia. Kaikentyyppinen taakkojen käsittely sisältää sekä puusto- että maaperävaurioriskin.

Maasto vaikuttaa korjuujälkeen sekä hakkuuvaiheessa että metsäkuljetuksessa. Suomessa maasto-olot ovat vain harvoin esteenä koneiden käytölle, mutta

vaikuttavat käytettävään tekniikkaan ja korjuuajan valintaan. Kaltevuus, kivisyys ja kantavuus vaikuttavat sekä puusto- että maaperävaurioiden määrään ja laatuun.

Kantavuusongelmia voidaan vähentää käyttämällä heikosti kantaville maille suunniteltuja koneita, korjuuvuodenajan valinnalla ja havutuksella. Hakkuukoneita käytettäessä urille ja reunapuiden juuriston suojaksi saadaan haluttaessa runsaskin havutus. Ajourien havutus vähentää ajourapainumia. Friesin (1974) mukaan painumien syvyys pienenee havutuksella puoleen havuttamattomaan uraan verrattuna. Vastaavanlaisia tuloksia havutuksen vaikutuksesta saivat Brunberg & Nilsson (1988, s. 3). Kun hakkuukone teki tutkimuskuusikossa eteensä havumaton, vaurioitui 4,8 % jäävästä puustosta, ja 47 % vaurioista oli juurivaurioita. Ilman havutusta jäävän puuston vaurioprosentti oli 6,8, josta 74 % oli juurivaurioita. Myös Isajev (1970), Hildebrand & Wiebel (1986), Eisenbart (1989, s. 265), Wronski (1990), Kairiukstis & Sakunas (1991, s. 123), Schäffer ym. (1991, s. 552), Schäfer & Sohns (1993, s. 454), Dale & Aamodt (1994), McMahon & Evanson (1994, s. 7), Löfgren & Landström (1994, s. 4) sekä Seixas ym. (1995, s. 231) ovat todenneet havutuksen vähentävän maaperävaurioita.

Vuodenaika vaikuttaa korjuujälkeen. Talvella maaperän ollessa jäässä ja lumen suojaamana urapainumien riski on vähäinen, ja myös puiden juurenniskat ovat suojassa vaurioitumiselta. Puustovaurioiden syntyherkkyyteen vaikuttaa kuoren erilainen irtoamisherkkyys eri vuodenaikoina. Alkukesällä nila-aikana vaurion syntyherkkyys on suurimmillaan. Wästerlundin (1986b, s. 67 - 71) mukaan männyn ja kuusen kuoren irrottamiseen tarvittava voima nila-aikana on 40 N/cm^2, muina aikoina vastaavasti 60 - 80 N/cm^2. Vuodenajan vaikutuksen vaurioiden syntyherkkyyteen ja kokoon on todennut myös Kärkkäinen (1973, s. 172), jonka tutkimuksessa kaikki vaurioiden dimensiot olivat kesällä suurempia kuin talvella.

Vuodenaika vaikuttaa valaistusoloihin metsässä. Korjuukoneet työskentelevät kiireisimpinä korjuukausina lähes ympärivuorokautisesti. Pimeänä vuodenaikana näkyvyysolot saattavat tiheässä harvennusmetsässä olla huonot, vaikka työkoneessa olisikin hyvät työvalot. Pimeällä näkyvyysalue on myös suppeampi ja ympäristön kokonaisvaltainen hahmottaminen on huonompaa kuin valoisana aikana.

2.7.3 Harvennustapa, ajourasto, korjuukone ja työskentelytapa

Harvennustapa saattaa vaikuttaa korjuujälkeen. Riviharvennus ja valikoiva harvennus poikkeavat työtekniikoiltaan. Riviharvennuksessa puita poistetaan ainoastaan avattavalta uralta. Avattavien rivien välissä olevat puut eivät tällöin

altistu samassa määrin vaurioitumiselle kuin valikoivassa harvennuksessa, jossa puita poistetaan ja käsitellään myös urien välissä.

Valikoiva harvennus voi olla alaharvennusta, tasaharvennusta tai yläharvennusta riippuen poistuman ja jäävän puuston kokosuhteista. Suomessa harvennus on perinteisesti ollut alaharvennusta. Viime vuosina myös muita harvennustapoja on kokeiltu. Kokeilujen taustalla ovat yritykset parantaa hakkuutyön tuottavuutta ensiharvennuksissa. Poistettavien puiden koko saattaa vaikuttaa myös vaurioitumiseen, koska puun käsittely vaikeutuu koon kasvaessa. Puiden pituus vaikuttaa vaurioitumisriskiin erityisesti kaato-vaiheessa. Pitkiä puita kaadettaessa vaurioitumiselle altistuu useampia puita kuin pienempiä puita kaadettaessa.

Ajourien leveys ja ajouraväli vaikuttavat koneiden työskentelyyn. Suomessa ajouravälin on oltava vähintään 20 m (Metsänhoitosuositukset 1989, s. 38). Ajouravälin ollessa 20 m koneellinen hakkuu on mahdollista poikkeamatta ajourilta. Hakkuukoneet pystyvät työskentelemään metsäkuljetusurien välissäkin hakkuu-urilla. Hakkuu-urilla työskentely pienentää kuitenkin tuottavuutta ja lisää korjuuvaurioriskiä. Pienten, alle 2 m:n levyisten hakkuukoneiden työtapaan kuuluu työskentely myös metsäkuljetusurien välissä. Pieniäkin koneita käytettäessä saattaa puusto- ja juuristovaurioiden riski kapeilla hakkuu-urilla olla suuri (Brunberg & Nilsson 1988, s. 3).

Jos keskitetään tarkastelu tavaralajimenetelmään, tutkimuksissa todetut vauriomäärät ovat olleet korkeampia täyskoneellisessa korjuussa kuin moottorisahahakkuussa ja sen jälkeisessä metsäkuljetuksessa erityisesti puustovaurioiden osalta. Kaadettaessa puita moottorisahalla ja valmistettaessa rungot tavaralajeiksi vaurioita syntyy käytännössä vain puita kaadettaessa, eikä näiden kaatovaurioiden määrä ole merkittävä. Hakkuukonetyössä puusto-vaurioita voivat aiheuttaa peruskone, nosturi, hakkuulaite sekä kaadettava ja käsiteltävä puu. Moottorisahahakkuuseen verrattuna vaurimahdollisuuksia on siis useita, ja työntekijän merkitys tulee korostetusti esiin konetyössä.

Hakkuukoneen koko, nosturi, hakkuulaite ja ergonomia saattavat vaikuttaa korjuujälkeen. Nosturin merkitys korostuu harvennuksissa, joissa työtilaa on vähän ja nosturityöskentelyltä vaaditaan tarkkuutta. Näkyvyys ohjaamosta ja ohjaamon ergonomia vaikuttavat kuljettajan työskentelyyn. Työvalojen merkitys korostuu harvennuksissa. Hakkuulaitteen koko vaikuttaa työn sujuvuuteen ja työtilan tarpeeseen.

Metsäkuljetusvaiheen vaurioriskit ovat usein pienemmät konehakkuun kuin moottorisahahakkuun jälkeen. Hakkuukoneen jäljiltä kasat ovat suurempia, ja ajouralle saadaan tarvittaessa runsas havutus. Kasojen suuri koko ja sijainti lähellä uraa merkitsee kuormausvaiheen vaurioriskien pienentymistä.

Erityisesti ensiharvennuksissa on hakkuutyön tuottavuuden lisäystä haettu usean rungon samanaikaisesta käsittelystä. Yksiotehakkuukoneen hakkuulaitteeseen kerätään tällöin useita puita ennen karsintaa ja katkontaa. Kerättäessä puita hakkuulaitteeseen siinä olevia puita joudutaan siirtelemään pystyasennossa. Tämä asettaa vaatimuksia peruskoneelle, nosturille ja kuljettajalle. Myös puustovaurioriski saattaa olla suurempi kuin yksinpuin käsittelyssä. Työn tehostuminen joukkokäsittelyssä vaatii puiden keräilyltä tehokkuutta. Taakka olisi saatava kokoon verraten lähellä toisiaan olevista puista. Tämä saattaa puolestaan vaikuttaa puuvalintaan.

2.7.4 Kuljettaja, työn tuottavuus, korjuun suunnittelu ja valvonta

Metsäkuljetuksessa vauriomäärien vaihtelu on suhteellisen pientä. Äärevät tapaukset selittyvät useimmiten työoloilla, esimerkiksi väärällä korjuuajalla. Sen sijaan hakkuukoneleimikoissa vauriomäärille on tyypillistä suuri, usein työoloistakin riippumaton vaihtelu. Kuljettaja nouseekin keskeiseksi vauriomäärien selittäjäksi hakkuukonetyössä.

Kuljettajan vaikutus myös hakkuukonetyön tuottavuuteen on suuri. Tämän vuoksi esimerkiksi maksuperusteita varten on kerättävä tietoa suuresta kuljettajajoukosta. Onkin syytä olettaa, että kuljettaja vaikuttaa tuottavuuden lisäksi oleellisesti myös korjuujälkeen. Kuljettajia kuvailtaessa ja luokiteltaessa tuottavuustaso on keskeinen tekijä.

Onko sitten tuottavuudella ja korjuujäljellä yhteyksiä, ja minkä suuntaisia vaikutukset ovat? Korkeaan tuottavuuteen liittyy helposti mielikuva hosumisesta; tekeekö kuljettaja korkeaa tuotosta korjuujäljestä tinkien? Tietämys tuottavuuden ja korjuujäljen yhteyksistä on vähäistä, sillä korjuujälkeä on tutkittu irrallaan korjuutapahtumasta. Jälkikäteen tehdyissä inventoinneissa on useimmiten selvitetty korjuukonetyyppi ja korjuun ajankohta, mutta kytkennät kuljettajan työtapaan ja työn tuottavuuteen puuttuvat.

On kuitenkin todennäköistä, ettei työn tuottavuustaso yksiselitteisesti selitä korjuujälkeä. Korkean tuottavuuden saavuttaminen vaatii kuljettajalta taitavuutta koneen käytössä, ja taidot mahdollistavat myös hyvän korjuujäljen. Toisaalta kokematonkin, työtä huolellisesti tekevä kuljettaja, voi tehdä hyvää korjuujälkeä työn tuottavuuden jäädessä kuitenkin alhaiseksi. Tuottavuuden ja korjuujäljen kytkennät ovat ilmeisimpiä silloin, kun taitamaton kuljettaja pyrkii korkeaan tuottavuuteen korjuujäljestä tinkien; koneen liikkeitä ja toimintoja ei vielä hallita, mutta työ olisi silti tehtävä ripeästi.

Pohdittaessa syitä kuljettajien välisiin tuottavuuseroihin samankin konemerkin käytössä nousevat työolojen lisäksi esiin kuljettajien erot kokemuksessa, työn

hahmottamisessa sekä motoriikassa. Korjuujäljen suhteen keskeiseksi tekijäksi nousee myös tietoisuus korjuujäljen merkityksestä. Jos taitava korkeaan tuottavuuteen pystyvä kuljettaja kokee korjuujäljen merkityksettömäksi, lopputulos voi olla huono.

Korjuun suunnittelu vaikuttaa korjuujälkeen. Puunhankintayhtiöt vastaavat usein ainoastaan korjuun aikataulusuunnittelusta ja leimikoiden rajauksesta. Aikatauluissakaan ei aina kyetä ottamaan korjuujälkikysymyksiä huomioon, jos leimikkovarannot ovat riittämättömät. Leimikoiden suunnittelu on siirtynyt yhä enemmän koneyrittäjille. Kuljettaja vastaa puuvalinnasta, puutavaran mittauksesta, apteerauksesta, työn tuottavuudesta, huollosta, yhteydenpidosta moniin sidosryhmiin ja usein uraston suunnittelustakin. Edellä esitettyä työlistaa tarkasteltaessa eivät korjuujälkikysymykset välttämättä ole koneyrittäjän tärkeysjärjestyksessä ensimmäisinä.

Korjuujäljen valvonta voi vaikuttaa korjuujälkeen. Tieto valvonnan olemassaolosta nostaa tietoisuutta korjuujäljen merkityksestä. Valvonta-tuloksista tulisi tiedottaa yrittäjille ja kuljettajille myös silloin, kun korjuujälki on hyvää. Korjuujäljen sisällyttäminen maksuperusteisiin motivoisi kuljettajia pyrkimään hyvään korjuujälkeen.

Suuri osa koneenkuljettajista on ns. pitkän linjan työntekijöitä, joiden työtaidot ovat kehittyneet käytännön työssä. Varsin usein hakkuukoneen kuljettajat ovat aiemmin ajaneet metsätraktoria. Hakkuukonetyön työnkuva poikkeaa oleellisesti metsäkuljetuksen vastaavasta. Vaikka kuljettaja hallitsisi koneen käytön muuten erinomaisesti, saattavat esimerkiksi tiedot puuvalinnasta ja jäävän puuston määrästä vaatia lisäkoulutusta.

2.7.5 Liiketyön määrä

Ruotsalaiset Blomqvist ym. (1984, s. 3) ja Bredberg (1985, s. 126) esittivät ajatuksen liiketyön määrän (trafikintensitet) vaikutuksesta korjuun tuottavuuteen ja korjuujälkeen. Hypoteesin mukaan korjuuvaurioiden määrä on sidoksissa liiketyön määrään, joka on ilmaistavissa hehtaarikohtaisena metrimääränä. Kaikki liiketyö, esimerkiksi nosturin, pyörän tai vintturin liike, sisältää vaurioitumisriskin. Liiketyö on jaettavissa kuljetustyöhön (tonnia x m/ha) ja liikemäärään (m/ha).

Hakkuukonetyössä liiketyön voidaan ajatella käsittävän peruskoneen liikkeet ja hakkuulaitteen liikkeet nosturin tyven suhteen. Tehollinen liiketyö puolestaan sisältää hakkuulaitteen liikkuman matkan (m/valmistettu runko tai m/valmistettu m^3) hakkuulaitteen viennissä puulle, puuta siirrettäessä, karsittaessa ja katkottaessa sekä tuotaessa hakkuulaite koneen lähelle.

Esimerkkinä Bredberg (1985, s. 126) esittää neliönmuotoisen 1 ha:n alueen korjuun kahta erilaista ajouraverkostoa käyttäen. Ensimmäisessä vaihtoehdossa alueen keskelle avataan metsätraktoria varten yksi ajoura, jonka varteen puut juonnetaan vintturilla. Vintturijuontotaakkojen pienen koon vuoksi liikemääräksi saadaan 8500 m/ha. Toisessa vaihtoehdossa alueelle avataan ajourat 20 m:n välein, jolloin liikemääräksi muodostuu 2500 m/ha.

Bredberg (1985) esitti ajatuksensa aikana, jolloin puunkorjuukoneen suuri koko yhdistettiin huonoon korjuujälkeen. Ratkaisevaa ei kuitenkaan ole työkoneen koko, vaan eri tyyppisen liiketyön, esimerkiksi hakkuussa siirtymisen, hakkuulaitteen ja puun siirtelyn määrä. Yksinkertaistettuna työkoneen koon vaikutus liiketyön määrään näkyy metsäkuljetuksessa, jossa suuri kuljetusväline tarvitsee pientä ajoneuvoa vähemmän ajokertoja saman puumäärän kuljettamiseen. Kun raiteenmuodostus on sidoksissa ajokertoihin, suuri koko ei välttämättä merkitsekään syvempiä raiteita.

Hakkuukonetyö koostuu siirtymisistä ja puiden käsittelyn työvaiheista. Kullakin työvaiheella on työoloista ja kuljettajasta riippuva vaurioriskinsä. On todennäköistä, että kuljettajan työtapa ja kyky suunnitella työtä vaikuttaa liiketyön määrään, jolla on yhteytensä sekä tuottavuuteen että korjuujälkeen. Näitä yhteyksiä ei kuitenkaan aiemmin ole tutkittu hakkuukonetyössä.

3 Työn tuottavuus hakkuukonetyössä

Hakkuutyön tuottavuus ja siihen vaikuttavien tekijöiden selvittäminen eivät ole käsillä olevassa tutkimuksessa keskeisesti esillä, vaan päätarkoituksena on tuottaa tietoa korjuujäljestä ja siihen vaikuttavista tekijöistä. Tuottavuuden tarkastelua ei kuitenkaan voi sulkea pois korjuumenetelmiä arvioitaessa. Vaikka jokin korjuumenetelmä antaisi ihanteellisen metsänhoidollisen tuloksen, menetelmän käyttö saattaa olla mahdotonta alhaisen tuottavuuden vuoksi. Toisaalta tehokkaankin menetelmän tulee täyttää vaadittavat korjuujälki-vaatimukset, jotta sen käyttö olisi mahdollista.

Yksittäisen korjuumenetelmän sisälläkin tuottavuudella ja korjuujäljellä on yhtymäkohtansa. Hakkuukonetyössä puiden käsittelypaikka vaikuttaa ajouralle saatavan havutuksen määrään, joka puolestaan vaikuttaa raiteenmuodostukseen sekä hakkuussa että metsäkuljetuksessa. Vaikuttaako puiden käsittelypaikka tuottavuuteen? Toisaalta voidaan kysyä, lisääkö kaukana ajourista sijaitsevien puiden tuonti uran reunoille käsiteltäviksi puustovaurioiden määrää, koska runkoja joudutaan liikuttelemaan enemmän kuin käsiteltäessä puut lähellä kasvupaikkaansa. Vaikka tuottavuutta on tutkittu paljonkin, huomio on kohdistunut rungon koon, puulajin, oksaisuuden ja leimikon tiheyden

vaikutusten selvittämiseen, ei niinkään tuottavuuden ja korjuujäljen mahdollisiin yhteyksiin.

Tuottavuus tarjoaa myös mahdollisuuden kuvata kuljettajia. Kovin selkeä mittari se ei kuitenkaan ole, koska työtulokseen vaikuttavat monet muutkin tekijät. Käsillä olevassa tutkimuksessa kuljettajien psyykkisiä tai psykomotorisia piirteitä ei testattu. Työn tuottavuus, kuljettajan kokemus ja taitotason subjektiivinen arviointi jäivät tavoiksi kuvata kuljettajia.

Hakkuukonetyön tuottavuutta on tutkittu paljon erityisesti Suomessa ja Ruotsissa. Lähtökohtana on ollut joko konemallien ja -tyyppien ominaisuuksien tutkiminen, työmenetelmien vertailu tai tiedon tuottaminen maksuperusteita varten. Suomessa tutkimuksia on tehnyt pääasiassa Metsäteho, Ruotsissa vastaavasti SkogForsk. Seuraavassa esitellään joitakin viimeaikaisia tutkimustuloksia keskittyen harvennushakkuisiin ja niissä ajourilta toimiviin hakkuukoneisiin.

Metsätehon tutkimusjulkaisuissa ei esitetä tehoajanmenekkiä kuvaavia yhtälöitä. Rungon koko, puulaji, poistettavan puuston tiheys ja jäävän puuston tiheys ovat keskeisiä hakkuutyön ajanmenekkiin vaikuttavia tekijöitä. Myös runsas aluskasvillisuus vaikuttaa työn ajanmenekkiin (Lilleberg 1990, s. 10).

Rummukainen ym. (1993) saivat käyttää Lillebergin (1990) aineistoa, josta laskettiin yksiotehakkuukoneen tehoajanmenekin ja rungon koon välinen riippuvuus harvennushakkuissa. Rummukaisen ym. (1993, s. 21) mukaan runkokohtaista tehoajanmenekkiä havupuilla kuvaa malli:

$$y = 34{,}7 + 0{,}13 * x + 1{,}25 * 10^{(-6)} * x^2 \qquad (1)$$

missä
y = runkokohtainen tehoajanmenekki, cmin/runko
x = rungon koko, dm^3

Lillebergin (1990, s. 6) mukaan ajanmenekki lehtipuiden hakkuussa on noin 15 % suurempi kuin havupuiden.

Ruotsissa Brunberg ym. (1989) laativat ehdotuksen yksiotehakkuukonetyön tuotosnormeiksi harvennuksissa. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvasi malli (Brunberg ym. 1989, s. 13):

$$y = 0{,}12 * x + 30 \qquad (2)$$

missä
y = runkokohtainen tehoajanmenekki, cmin/runko
x = rungon koko, dm^3

Brunbergin ym. (1989, s. 13) mallin antama ajanmenekkitaso on hieman alempi kuin Rummukaisen ym. (1993, s. 18) mallin antama taso.

Hakkuukoneiden kehitys on viime vuosina ollut nopeaa. Uusinta tuottavuustietoa edustaa Brunbergin (1997) ehdotus yksiotehakkuukoneen tuotosnormeiksi Ruotsissa. Mallissa konetyön ajanmenekki jaetaan siirtymisten ajanmenekkiin, puiden kaadon ja käsittelyn ajanmenekkiin ja muuhun tuotantoaikaan.

Runkokohtaista tehoaikaa kuvaamaan Brunberg (1997, s. 11) esittää yhtälön, jossa pääryhminä ovat mänty ja kuusi. Yhtälöstä voidaan laskea lehtipuiden, urapuiden, metsäkuljetusurien väliseltä hakkuu-uralta käsiteltyjen ja moottorisahalla hakkuukoneen ulottuville kaadettujen puiden vaikutus runkokohtaiseen tehoaikaan. Ruotsissa kokeillaan alaharvennuksen ohella myös harvennustapaa, jossa poistetaan sekä pieniä että suuria puita sekä selkeää yläharvennusta. Malli ottaa huomioon myös harvennustavan vaikutuksen.

Harvennusten yleistyessä kiinnostus tavaralajimenetelmää kohtaan on lisääntynyt myös Pohjois-Amerikassa. Tufts & Brinker (1993) tutkivat Norcar 600 H -hakkuukonetta Loblolly männikön (*Pinus taeda*) toisessa harvennuksessa. Tutkimuskonetta käyttivät sekä kokenut suomalainen kuljettaja että amerikkalainen kuljettaja, jolla oli kolmen kuukauden kokemus hakkuukonetyöstä. Todennäköisestä vähäisemmästä kokemuksesta johtuen amerikkalaisen kuljettajan työn tuottavuus oli 85 % suomalaisen kuljettajan saavuttamasta (Tufts & Brinker 1993, s. 29).

Valmet 546 Woodstar -yksiotehakkuukonetta tutkittiin Loblolly männikön harvennuksessa Alabamassa. Hakkuukone valmisti keskimäärin 105,6 puuta tehotunnissa puiden keskimääräisen rinnankorkeusläpimitan ollessa 6,2 tuumaa. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä hakkuukonetyössä kuvasi seuraava yhtälö (Lanford & Stokes 1996, s. 49):

$$y = 0{,}223 + 0{,}0536 * dbh \qquad (3)$$

missä
y = runkokohtainen tehoaika, min/runko
dbh = käsiteltävän puun rinnankorkeusläpimitta, tuumaa (tuuma = 2,5 cm)

Tufts (1997) tutki Ponsse HS 15 -hakkuukonetta Loblolly männikön toisessa harvennuksessa Alabamassa. Rungon koko ja rungosta valmistettujen pölkkyjen lukumäärä vaikuttivat eniten hakkuukoneen työn tuottavuuteen. Tutkimuksessa todettiin varsin korkea keskimääräinen tehotuntituotos, 34,6 m^3. Keskimääräinen rungon koko tutkimusleimikolla oli 263 dm^3.

Tutkimuksessa hakkuukonetyötä analysoitiin monipuolisin mittauksin. Aineiston keruuseen osallistui kolme työntutkijaa. Yksi heistä oli mukana ohjaamossa ja kirjasi jokaisen valmistetun pölkyn läpimitan ja pituuden. Toinen työntutkija arvioi nosturin kulman koneeseen nähden ja puun ottoetäisyyden sekä peruskoneen kulkeman matkan. Kolmas työntutkija videoi työtapahtumat, ja eri työvaiheitten osuudet määriteltiin videonauhalta. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvasi yhtälö (Tufts 1997, s. 42):

$$y = 6{,}220 + 30{,}34 * vol * pc + 1{,}164 * reach + 0{,}1334 * vol * rot - 3{,}900 * vol * len \quad (4)$$

missä
y = runkokohtainen tehoajanmenekki, sekunttia
vol = rungon koko, m^3
pc = rungosta valmistettujen pölkkyjen lukumäärä
reach = puun ottoetäisyys, m
rot = nosturin asento koneen keskilinjan suhteen, astetta
len = rungon kaupallisen osan pituus, m

Ryynänen (1994, s. 39 - 40) tutki maataloustraktoriperustaisia hakkuukoneita männikön ensiharvennuksessa. Fendt 380/Patu 350 -hakkuukoneella, jonka kuormaimen ulottuvuus oli 8,2 m, selvitettiin mm. ottoetäisyyden ja -sektorin vaikutusta runkokohtaiseen tehoaikaan. Käsittelyaikaa 2 - 4 m:n etäisyydellä koneen edestä ja viistosti sivulta otetuilla puilla kuvasi suhdeluku 100. Aivan koneen vierestä otetuilla puilla tehoaikaa kuvasi suhdeluku 102 - 103. Suoraan koneen edestä puita otettaessa työ hidastui vasta 6 m ottoetäisyyden jälkeen, kun taas sivusektoreilla, joilla jouduttiin varomaan kasvatettavia puita, työ hidastui selvästi jo yli 4 m:n etäisyydellä. Runkokohtaisen tehoajan suhdeluku yli 6 m:n ottoetäisyyksillä oli 125 - 136.

Kone- ja menetelmävertailua vaikeuttaa työn tuottavuuden voimakas riippuvuus kuljettajasta. Osittain tämän vuoksi erilaisten korjuumenetelmien vertailussa on yhä useammin päädytty simulointimallien käyttöön. Tietokonesimulointi tarjoaa menetelmän, jolla puunkorjuun toimintojen monimutkainen yhdistelmä voidaan jakaa erikseen analysoitaviin osiin. Yhdistämällä osatulokset saadaan selville muutoksen vaikutukset koko järjestelmään (Stuart 1980). Almqvistin (1973) mukaan simuloimalla voidaan puunkorjuussa tutkia työn tuottavuuden ja koneiden ominaisuuksien välistä riippuvuutta, vertailla työmenetelmiä sekä selvittää tuottavuuden riippuvuutta työoloista. Simulointitutkimuksin voidaan myös generoida metsiköitä, kun puiden tilajärjestys tunnetaan (Pukkala 1988, s. 4 - 9).

Puunkorjuukoneita ja -menetelmiä on tutkittu simuloimalla 1960-luvun lopulta lähtien (Sjunnesson 1970, Santesson & Sjunnesson 1972, Almqvist 1973, Haarlaa 1973 ja Goulet ym. 1979. Ruotsissa simuloinnissa käytettiin Bredbergin (1972) mittaamia mallimetsiköitä, ja laskelmia tehtiin runkotasolla.

1980- ja 1990-luvuilla simulointia on käytetty pääasiassa erilaisten korjuumenetelmien vertailuun ja puunhankinnan suunnitteluun. Simulointitutkimuksia on tehty erityisesti Pohjois-Amerikassa (Goulet ym. 1980a ja 1980b, Winsauer 1980 ja 1982, Stuart 1981, Fridley ym. 1982, Reisinger ym. 1988, Bass ym. 1991 ja Wang & Greene 1996). Suomessa simulointia korjuumenetelmien vertailussa tai puunhankinnan suunnittelussa ovat käyttäneet mm. Seppälä (1971), Harstela & Maukonen (1983), Mikkonen (1983), Asikainen (1995) ja Gallis (1997).

Eliasson (1996, s. 2 - 8) on Ruotsissa laatinut hakkuukonetyön simulointimallin, joka koostuu siirtymismallista ja nosturin liikkeitä ja puun käsittelyä kuvaavasta mallista. Malli ottaa huomioon puuston asettamat rajoitukset nosturityöskentelyssä. Vertaillessaan mallin antamia tuloksia käytännön tutkimustuloksiin, Eliasson (1996, s. 11 - 13) totesi mallin antavan yliarvion tuottavuudesta, ja toisaalta mallin antama runkokohtaisen ajanmenekin vaihtelu oli käytännössä todettua pienempi.

Aedo-Ortiz ym. (1997) pyrkivät ottamaan huomioon aikatutkimuksissa todetun ajanmenekin vaihtelun jakaumat ja jakaumien muodot simuloidessaan hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjun työskentelyä. Kehitetty simulointimalli ei kyennyt ennustamaan työolojen vaikutusta kovinkaan hyvin, koska aikatutkimusaineistoa ei kerätty simuloinnin tarpeita silmällä pitäen. Simulointimallin kehittämisen ja sen pohjana olevan aikatutkimusaineiston keruun tulisi olla vuorovaikutteista. Vuorovaikutuksesta hyötyisivät sekä simulointi että käytännön aikatutkimus (Aedo-Ortiz ym. 1997, s. 40).

Yksiotehakkuukonetyötä on simuloinut myös Kaivola (1995), jonka malli mahdollistaa joukkokäsittelyn tutkimisen. Kaivolan mukaan simulointi edellyttää riittävää kenttä- ja aikatutkimusmateriaalia, jonka tulee selvittää työolomuuttujien ja työvaiheiden ajanmenekin väliset riippuvuudet luotettavasti.

Hakkuukonetyön tarkka mallintaminen on vaikeaa. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä selittävissä malleissa ovat useimmiten selittäjinä vain puulaji ja rungon koko, vaikka moni muukin asia vaikuttaa ajanmenekkiin. Mallintamista vaikeuttaa myös se, että hakkuukonetyöhön sisältyy satunnaista ja usein tarpeetonta, kuljettajasta riippuvaa liikettä, jonka takia todellinen ajanmenekki on laskennallista suurempi. Tämä näkyi esimerkiksi Eliassonin (1996, s. 9) hakkuukonemallin antaessa yliarvion tuottavuudesta. Bass ym. (1991) toteavatkin, että metsäkonetta kuvaavan simulointimallin on toimiakseen kyettävä mallittamaan koneen todelliset liikkeet, joiden on oltava vuorovaikutuksessa ympäristöön.

4 Tutkimustehtävä ja sen rajaukset

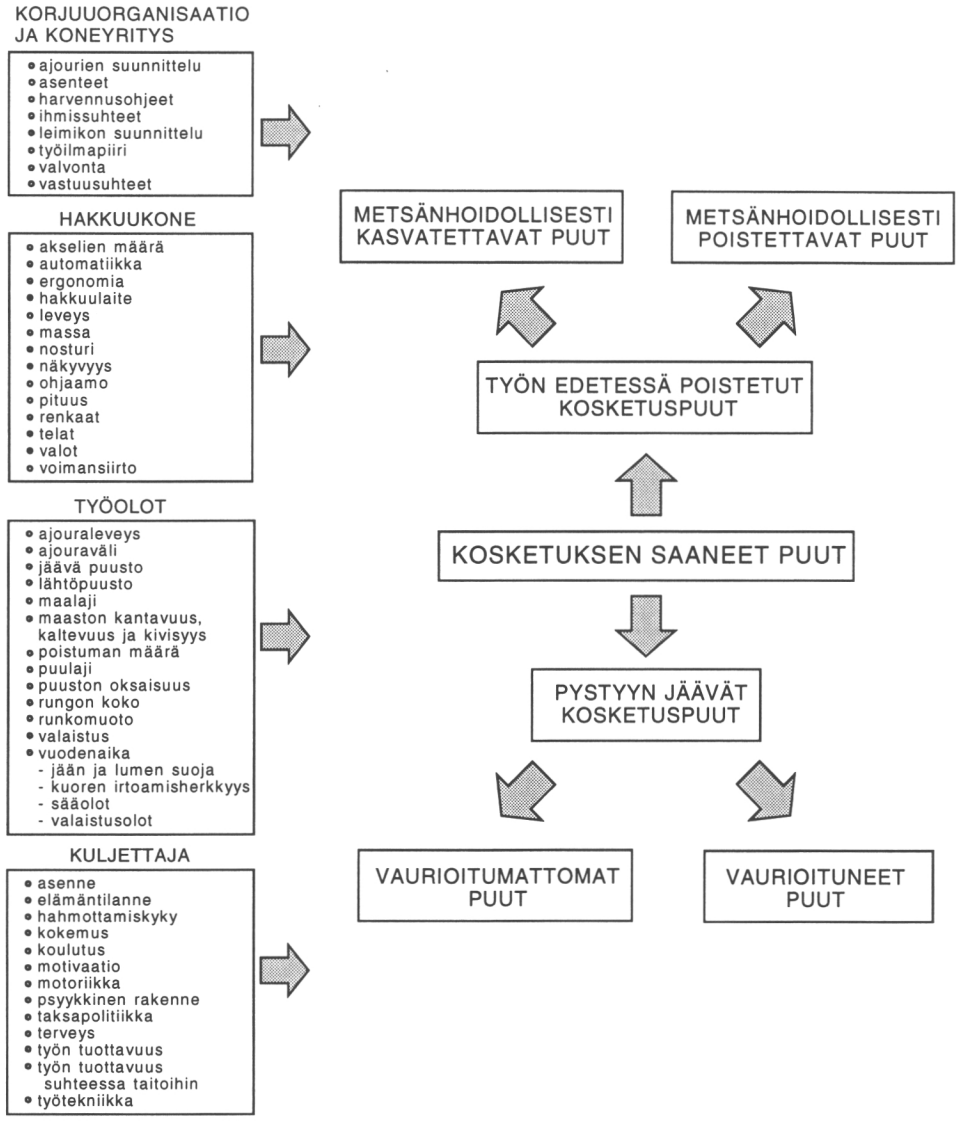
Suomessa yli kaksi kolmasosaa harvennuksista tehdään koneellisesti. Hakkuukoneina käytetään yleensä ajourilta toimivia yksiotehakkuukoneita. Vaikka korjuujälki-inventointien perusteella koneellisen harvennuksen jälki on keskimäärin hyväksyttävää, erityisesti puustovaurioiden määrä vaihtelee leimikoittain runsaastikin. Syitä suureen vaihteluun ei ole pystytty luotettavasti selittämään.

Korjuujälkeä on tutkittu jälkikäteen tehdyin mittauksin, jolloin tieto vaurioiden aiheuttajista ja syistä on arvionvaraista. Mittaukset on useimmiten tehty metsäkuljetuksen jälkeen. Tällöin hakkuukoneen ja metsätraktorin aiheuttamia vaurioita ei pystytä varmuudella erittelemään. Inventoinneissa käytetyt jäävän puuston mittausmenetelmät ovat mitanneet jäävän puuston määrää, mutta eivät ole antaneet tarkkaa tietoa jäävän puuston ja poistuman määrästä ja laadusta eri etäisyyksillä ajourista.

Jälkikäteen mitatut korjuujälkitulokset ovat irrallinen osa korjuutyökokonaisuudesta. Tuloksista on ehkä luettavissa puun ostaja, korjuuyrittäjä, konemerkki ja korjuuaika. Kuitenkaan esimerkiksi vauriopuiden osuuksia tarkastelevalla lukijalla ei ole tietoa kuljettajan työskentelytavasta, tuottavuustasosta tai vaurioitumiseen johtaneista syistä. Laaja-aineistoiset jälki-inventoinnit puoltavat paikkaansa korjuujäljen yleistason kuvaajina ja eri menetelmien tasoeroja haettaessa, mutta tulosten yleistettävyys ja syvällinen tarkastelu on vaikeaa.

Käsillä olevassa tutkimuksessa tarkastellaan ajouralta toimivan yksiotehakkuukoneen työskentelyä kokonaisvaltaisesti. Yhdistämällä työn tuottavuuden, korjuujäljen ja niihin vaikuttavien tekijöiden tutkimus haetaan tietoa työolojen ja kuljettajan työskentelytavan vaikutuksista työtulokseen. Tutkimuksessa selvitetään erityisesti puustovaurioiden määrään ja laatuun vaikuttavia tekijöitä pyrkien samalla luomaan menetelmä puustovaurioiden ennustamiseen. Puustovaurioiden syntymekanismia ja siihen mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä esittää kuva 7.

Korjuujäljen syntymekanismia selvitettäessä joudutaan väkisinkin myös koko hakkuutapahtuman analysointiin. Koska korjuujäljen kuljettajakohtainen vaihtelu on suurta, on kuljettajien työskentelyä pystyttävä kuvaamaan ja etsimään kiinnekohtia korjuujälkeen. Kuljettajan ja yleensä työntekijän kuvaamiseen on useita mahdollisuuksia. Harstela (1975, s. 41) mittasi tutkimuksessaan työntekijöiden fyysisiä ja psyykkisiä ominaisuuksia. Psyykkisten ja psykomotoristen ominaisuuksien mittauksessa ja kuvaamisessa Harstela käytti Työterveyslaitoksen testisarjaa.



Kuva 7. Kaaviokuva tekijöistä, jotka voivat vaikuttaa puustovaurioiden määrään hakkuukonetyössä.

Leskinen & Mikkonen (1981) selvittivät metsäkoneiden kuljettajille asetettavia vaatimuksia. Kuljettajaoppilaiden suoritustasoa kuvaamaan saatiin faktorianalyyttisen tutkimuksen tuloksena kolmen tekijän malli, jonka avulla voitiin ennustaa kuljettajaoppilaiden suoritustasoa. Faktoreille annettiin nimet tehokkuusfaktori, taitofaktori ja koulumenestysfaktori. Leskisen & Mikkosen (1981, s. 12) mukaan tarkkuuskorosteinen taitavuus työtilanteissa on parhaiten mitattavissa koordinaatiokyvyn tarkkuutta korostavilla testeillä. Tehokkuutta ennustivat parhaiten koordinaation nopeus ja tekninen lahjakkuus.

Jos kuljettajia ei luokitella testien avulla, työn tuottavuus ja työskentelytapa antavat käytännönläheisen mahdollisuuden kuvata kuljettajia. Näin on myös toimittu tässä tutkimuksessa, mutta perinteiseen työvaiheiden ajanmenekkiä selvittävään mittaustapaan on lisätty elementtejä, jotka saattaisivat selittää sekä työn tuottavuutta että korjuujälkeä. Kuljettajan työskentelytapaa kuvaa tavallaan myös hakkuutyössä tehtävän liiketyön määrä. Käsillä olevassa tutkimuksessa tutkimuskuljettajia kuvataan saavutetulla työn tuottavuudella ja tehdyn liiketyön määrällä.

Tutkimuksen keskeiset tavoitteet ovat seuraavat:

- Selvittää puustovaurioiden määrä ja laatu sekä niihin vaikuttavat tekijät hakkuukonetyössä.
- Selvittää jäävän puuston ja poistuman määrä, laatu ja jakautuminen samoin kuin ajourien ja maaperävaurioiden määrä ja laatu.
- Analysoida työn tuottavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä tuottavuuden ja korjuujäljen yhteyttä.
- Esittää menetelmä puustovaurioiden määrän ja laadun ennustamiseksi.

Käytössä olleiden resurssien niukkuuden takia joitakin tuloksiin mahdollisesti vaikuttavia tekijöitä vakioitiin. Aineistoa kerättiin yhdestä hakkuukonemerkistä (Valmet 901 varustettuna Valmet 942 -hakkuulaitteella). Konemerkin valinnan ratkaisivat käytännön syyt. Valmet 901 on harvennuksissa paljon käytetty työkone. Vaikka aineiston keruuaikana leimikkorakenne oli päätehakkuupainotteinen, verraten pienellä Valmet 942 -hakkuulaitteella varustettujen koneiden työmaista suuri osa oli harvennuksia.

Puutavara valmistettiin kaikilla tutkimustyömailla pitkäksi 4 - 5 m:n rangaksi tai tukiksi. Tutkimuskohteet rajattiin maastoluokkaan 1 (Perustason maksut... 1991, s. 6) Leimikoiksi valittiin pääasiassa kuusivaltaisia harvennusleimikoita. Mukaan otettiin sekä 1. että 2. harvennuksia, jäävän puuston minimimääränä pidettiin 550 runkoa/ha.

5 Tutkimusmenetelmä ja -aineisto

5.1 Tutkimusmenetelmän valinta

Tutkimusmenetelmää valittaessa punnittiin useita vaihtoehtoja. Puustovaurioiden määrää ja laatua on yleensä mitattu jälkikäteen tehdyin mittauksin. Luvussa 2 esiteltiin korjuujälkitutkimuksissa käytettyjä mittausmenetelmiä ja niiden vertailtavuutta. Pohjoismaissa on käytetty joko tutkimusleimikoiden tai niiden osien läpikäymiseen perustuvia menetelmiä tai

koealamittauksiin perustuvia menetelmiä. Poikelan (1992) vertailu osoitti selvästi koealamittaustavan edut koko leimikon läpikäyntiin perustuvaan inventointitapaan verrattuna. Björhedenin & Frödingin (1986) esittämää ympyräkoealoihin perustuvaa mittaustapaa voidaan pitää vallitsevana pohjoismaisena korjuujäljen mittaustapana. Toinen vaihtoehto puustovaurioiden tutkimiselle on puustovaurioiden synnyn seuranta korjuutyön tapahtumahetkellä. Tätä lähestymistapaa ovat käyttäneet Nilsson (1985), Harstela & Maukonen (1983), Sirén (1990, s. 20) ja Athanassiadis (1997).

Sekä puustovaurioiden jälkikäteen tapahtuvalla että tapahtuma-aikaisella tutkimuksella on etunsa. Menetelmävalinnan ratkaiseekin se, minkä tyyppistä tietoa puustovaurioista halutaan. Jos tavoitteena on pelkästään puustovaurioiden määrän ja laadun toteaminen, jälkikäteen tehtävä koealamittaus lienee selkeä valinta. Koealamittaus on riippumaton korjuutyön aikataulusta ja konetyön mahdollisista keskeytyksistä. Mahdollisen otantakehikon tutkimusleimikoille voivat muodostaa edellisen vuoden aikana jollakin alueella korjatut leimikot.

Korjuujälkeä mitattaessa puustovauriot eivät ole ainoa kiinnostuksen kohde. Myös jäävän puuston ja poistuman määrästä, ajourista ja ajourapainumista halutaan tietoja. Näiden tietojen keruu käy luontevasti pääosin samoilta koealoilta kuin puustovaurioidenkin inventointi. Vaikka koealoihin perustuva korjuujäljen mittaus on maastotyön vuoksi kallista, kustannukset ovat kuitenkin pienemmät kuin konetyön aikatauluun sidotussa tapahtuma-aikaisessa työntutkimuksessa, jossa tutkimusjakson päätyttyäkin joudutaan vielä tekemään jälkimittauksia.

Jälkikäteen tehtävillä mittauksilla on huono kohtansa; tiedot esimerkiksi puustovaurioiden aiheuttajista jäävät arvionvaraisiksi. Käsillä olevan tutkimuksen tavoitteet eivät ole ratkaistavissa pelkästään jälkikäteen tehtävillä koealamittauksilla. Vaurioiden syntymekanismia selvitettäessä työntutkimus antaa todellisen kuvan työoloista pystypuihin syntyvien kosketusten tapahtumahetkellä. Hakkuutyön edetessä kuljettaja poistaa osan vauriopuista, jotka on mahdollista luokitella kuuluviksi joko metsänhoidollisesti poistettavaan tai kasvatettavaan jaksoon. Työntutkimuksella voidaan selvittää myös vuodenajan vaikutusta kosketuksista syntyvien vaurioiden määrään ja laatuun. Tieto kosketusten ja vaurioiden syntyhetken työoloista mahdollistaa vaurioitumisprosessin mallittamisen.

Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin myös jäävän puuston, poistuman, ajourien sekä maaperävaurioiden määrän ja laadun selvittäminen. Yleensä näitä asioita on mitattu mittauslinjoille määrävälein sijoitettavilta ympyräkoealoilta, uratietoja vastaavasti lähinnä ympyräkoealaa olevalta ajouralta. Ympyräkoealoihin perustuva mittaus ei kuitenkaan anna tarkkaa kuvaa jäävästä puustosta ja poistumasta eri etäisyyksillä ajourista. Tämän vuoksi

tutkimuksessa päädyttiinkin käyttämään määrävälein ajourien molemmille reunoille sijoitettavia, vyöhykkeisiin jakautuvia koealoja. Tutkimuksessa käytetty työntutkimusmenetelmä ja jälkimittausmenetelmä esitellään seuraavassa.

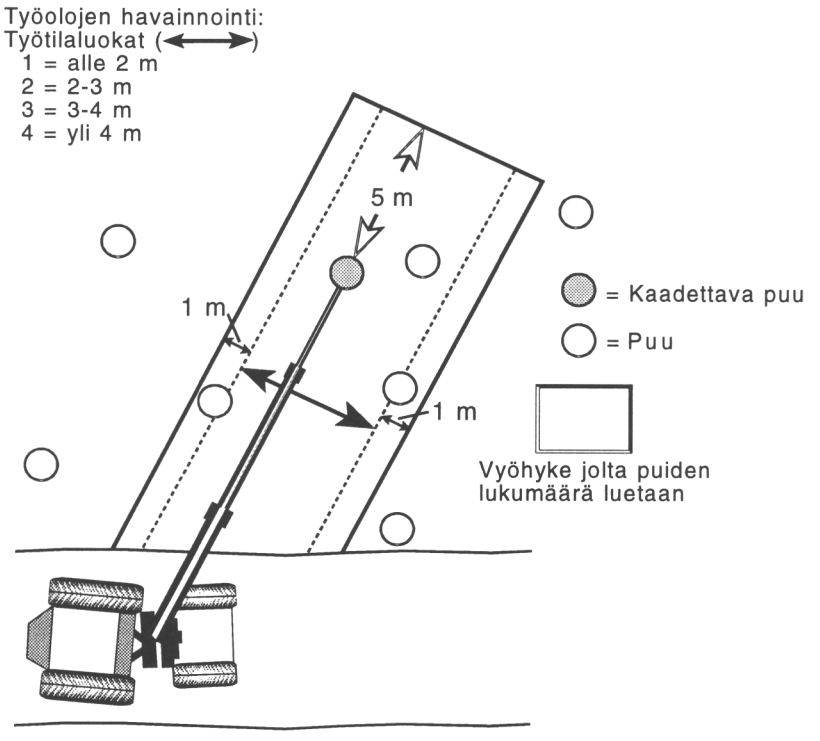
5.2 Työntutkimus

Työntutkimuksen ensisijaisena tarkoituksena oli puustovaurioiden syntymekanismin selvittäminen. Puustovaurioiden tutkimus tapahtui työn suoritushetkellä, ja puukohtaiset työolot määritettiin mahdollisimman tarkasti. Työn tuottavuutta ja liiketyön määriä mitattiin korjuujäljen ja tuottavuuden välisten yhteyksien löytämiseksi. Tuottavuuteen vaikuttavia puuston runkokohtaisia ominaisuuksia, kuten oksaisuutta runkotasolla, ei otettu huomioon.

Hakkuukonetyön tuottavuuden, puukohtaisten työolojen ja kosketusten tutkimus perustui kolmen työntutkijan samanaikaiseen työskentelyyn. Työvaiheista kerättiin kolmenlaista tietoa. Yksi työntutkijoista keräsi *hakkuutyön tuottavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä* kuvaavat tiedot Husky Hunter -tiedonkeruulaitteella Siwork3 -tutkimusohjelmistolle laaditulla aikatutkimusohjelmalla. Kerätyt tiedot ja käytetyt luokitukset on esitetty liitteessä 1 sivulla 169.

Toinen työntutkija seurasi *työoloja ja liikemääriä*. Liikkeiksi luettiin peruskoneen liikkeet ja hakkuulaitteen liikkeet nosturin tyven suhteen. Sen sijaan käsiteltävän puun esimerkiksi karsittaessa kulkemaa matkaa ei arvioitu. Kerätyt tiedot ja käytetyt luokitukset on esitetty liitteessä 1 sivulla 169. Työtila ja työalueella olevien puiden lukumäärä arvioitiin kuvassa 8 esitetyllä tavalla.

Kolmas työntutkija seurasi pystypuihin syntyviä *kosketuksia*. Kosketustiedot merkittiin lomakkeelle, jolle kirjattiin myöhemmin myös kosketuspuiden jälkimittaustiedot. Kosketuksiksi luettiin puiden runkoihin tai juurenniskoihin kohdistuneet kosketukset. Ainespuumittaa täyttämättömiin puihin samoin kuin urapuihin syntyneitä kosketuksia ei rekisteröity. Hentojen oksien aiheuttamia pyyhkäisyjä ei luettu kosketuksiksi. Kosketusten seuraaja ilmoitti muille työntutkijoille kosketuksen tapahtumisesta, jolloin nämä kirjasivat kosketuksen ja samalla ilmoittivat työpisteen ja havainnon numeron, jolla kosketus tapahtui. Muut työntutkijat ilmoittivat myös havaitsemistaan kosketuksista kosketusten seuraajalle, jotta kosketukset saatiin mahdollisimman hyvin havainnoitua. Kosketuspuihin kiinnitettiin numerolaput, ja tutkimusjakson päätyttyä kosketuspuut mitattiin. Kosketuksista rekisteröidyt ja kosketuspuista mitatut tiedot on esitetty liitteessä 1 sivulla 169.



Kuva 8. Tutkimuksessa käytetty menetelmä työtilan ja työalueella olevien puiden lukumäärän/ha määrittämiseksi.

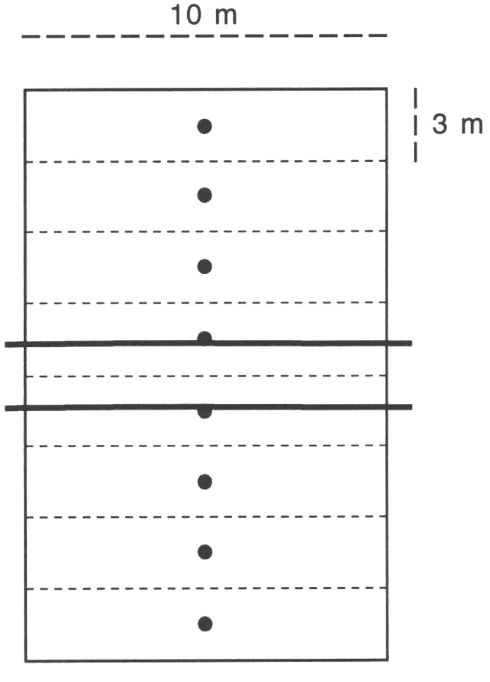
Tutkimusta aloitettaessa oli epäselvää, miten konetyön ja työolojen tutkimus onnistuu tiheässä harvennusmetsässä. Myös työntutkijoiden työskentelyn turvallisuus koneen lähellä huolestutti. Työolojen määrityksessä kokeiltiin videointia asentamalla valvontavideokamera ohjaamon kattoon kuljettajan pään yläpuolelle. Koska ohjaamo liikkui nosturin kanssa, kuva seurasi työn edistymistä. Hakkuukoneen nosturiin maalattiin merkit, joista voitiin määrittää hakkuulaitteen etäisyys nosturin tyvestä. Käsiteltäviä puita merkittiin ja mitattiin, ja niiden koko arvioitiin myöhemmin videolta.

Videotutkimus osoittautui toimivaksi vaihtoehdoksi, ja myös työolojen määrittäminen onnistui. Videotekniikan käyttö olisi kuitenkin aiheuttanut keskeytyksiä konetyöhön, ja aineiston jälkikäsittely olisi ollut työlästä. Videotekniikan käytöstä aineiston keruussa luovuttiin myös siksi, että työntutkijoiden tekemä tutkimus osoittautui toimivaksi ja turvalliseksi.

5.3 Jälki-inventointi

Jälki-inventointi tehtiin hakkuun jälkeen ennen metsäkuljetusta, joten tuloksiin ei sisälly metsäkuljetuksen aiheuttamia puusto- ja maaperävaurioita. Jälki-inventointi tehtiin kaikissa työntutkimusleimikoissa. Niiden lisäksi inventoitiin työntutkimuskuljettajilta yhteensä viisi leimikkoa, joissa työntutkimusta ei tehty. Kahdelta muulta kuljettajalta jälki-inventoitiin edellisten lisäksi yhteensä neljä leimikkoa.

Suorakaiteen muotoiset koealat sijoitettiin urille 30 m:n tai 40 m:n välein leimikon koosta riippuen. Leimikon laitimmaisen uran alusta arvottiin 1 - 10 m:n matka, josta ensimmäinen koeala sijaitsi 30 m:n tai 40 m:n päässä. Koealan alkupisteestä lähtien uralta rajattiin 10 m matka. Tälle matkalle rajattiin merkkikepein kohtisuoraan uran kulkusuuntaa vastaan 240 m^2:n koeala, joka käsitti molemmilla puolilla uraa 4 kappaletta 10 m x 3 m vyöhykettä. Koealan rakenne ja siltä tehtävät mittaukset esitetään kuvassa 9. Mitatut tiedot ja niiden luokitukset on esitetty liitteessä 2 sivuilla 171-172.



3 m leveiltä vyöhykkeiltä mitattiin
- pohjapinta-ala (●)
- puiden lukumäärä
- puulajisuhteet
- keskiläpimitta
- kantojen lukumäärä ja keskiläpimitta
- raivattujen puiden lukumäärä
- metsänhoidollisesti poistettavien puiden lukumäärä
- puustovaurioiden määrä, laatu ja sijainti

Uralta mitattiin
- uraleveys
- painumat
- maastotiedot
- havutuksen määrä
- kohtisuora etäisyys lähimpiin uriin

Kuva 9. Jälki-inventoinnin koeala ja siltä tehdyt mittaukset. Ajoura sijaitsee keskellä koealaa.

5.4 Tutkimusleimikoiden valinta

Kärkkäinen (1969, s. 8) harkitsi tutkimuksessaan osapopulaation rajaamiseksi seuraavia vaihtoehtoja:

- Täsmennetään populaatiota hankkimalla informaatiota sen alkioiden ominaisuuksista ja arvotaan näyte, joka edustaa populaatiota todennäköisyyslaskennalla hallittavissa olevalla tavalla.
- Rajoitetaan populaatiosta alueellisesti osa, josta arvotaan otos. Tulokset ovat tällöin yleistettävissä rajattuun osapopulaatioon.
- Valitaan populaatiosta työmaita, joiden avulla laaditaan haluttu ennustemalli ja kokeillaan ennustamisen osuvuutta toisiin populaatiosta hankittuihin työmaihin.

Ensimmäinen ja toinen vaihtoehto antavat Kärkkäisen (1969, s. 8) mukaan satunnaisnäytteen tunnetusta populaatiosta. Näytteestä voidaan tehdä johtopäätöksiä sekä populaation parametreista että ominaisuuksien keskinäisistä riippuvuuksista. Kolmannessa vaihtoehdossa puolestaan saataisiin edustava näyte tuntemattomasta osapopulaatiosta. Populaation parametrien estimointi olisi mahdollista, mutta vallitsevasta epävarmuudesta olisi vaikea sanoa mitään.

Kärkkäinen (1969, s. 9) päätyi osapopulaation rajaamisessa kolmanteen vaihtoehtoon sen heikkouksista huolimatta. Painavana syynä oli aineiston hankintaan varattujen resurssien rajallisuus. Käsillä olevassa tutkimuksessa olisi myös noudatettu osapopulaation rajaamisessa Kärkkäisen (1969) valitsemaa vaihtoehtoa, elleivät seuraavat käytännön syyt olisi rajoittaneet leimikoiden valintaa ja aineiston määrää:

- Työtulokseen vaikuttavia seikkoja pyrittiin vakioimaan. Tutkimusaineisto koski yhtä konemerkkiä, jossa lisäksi hakkuulaite oli vakioitu. Tutkimuskuljettajien määrä oli rajoitettu. Tutkimusleimikoiksi valittiin kuusivaltaisia leimikoita, joilla puutavara valmistettiin 4-5 m:n rangaksi tai tukiksi. Tutkimusleimikoiden oli oltava maastoluokkaa 1.
- Työntutkimusaineisto kerättiin hakkuutyön tapahtumahetkellä ja jälkimittaukset tehtiin ennen metsäkuljetusta. Urakoitsijoiden koneita ei voinut kustannussyistä seisottaa mittausten takia. Koneet työskentelivät kahdessa vuorossa, jonka vuoksi työmaiden piti olla riittävän suuria mahdollistamaan toisen vuoron häiriötön työskentely.
- Tutkimuskoneet olivat yhtä lukuun ottamatta normaalissa urakointisuhteessa olevia koneita, joiden työohjelmat suunniteltiin puunhankintayhtiöissä. Vain osa työmaista oli harvennuksia. Niistäkin vain osa täytti tutkimusleimikoiden valintakriteerit.

- Tutkimusaineiston keruu vaati kolmen työntutkijan samanaikaista työpanosta. Koko aineiston keruun ajan sama työntekijä hoiti tietyt hänelle määrätyt tehtävät. Aineiston keruu oli aikaa vievää ja kallista.
- Aineistoa kerättiin verraten pitkällä aikavälillä. Urakoitsijoiden konemerkin vaihdot samoin kuin työsopimusten muuttuminen toisille, työoloiltaan erilaisille alueille, muodostivat riskin aineiston keruulle. Osalla tutkimuskuljettajista aineisto jäikin edellä mainituista syistä johtuen riittämättömäksi.

Tutkimusleimikoita ei voitu edellä esitetyistä syistä johtuen poimia laajasta populaatiosta. Tutkimukseen valittiin neljä hakkuukonetta, joilla työohjelman mukaan oli tiedossa harvennuksia ja jotka lisäksi toimivat suhteellisen lähellä Helsinkiä. Tutkimuskoneita käytettiin kahdessa vuorossa, ja kuljettaja, joka ensimmäisellä tutkimusleimikolla oli aamuvuorossa, valittiin tutkimus-kuljettajaksi. Tutkimukseen valittujen hakkuukoneiden työohjelmista eriteltiin valintakriteerit täyttävät leimikot.

Korjuun vuodenajan perusteella tutkimusleimikot ryhmiteltiin kolmeen luokkaan. Talviaineistoon luettiin pakkaskautena ja lumen ollessa maassa korjatut leimikot. Sulan maan aikana korjatut leimikot jaettiin kesäaikaisiin (1.5 - 15.8) ja muihin sulan maan leimikoihin. Kesäleimikoiden löytäminen oli erityisen vaikeaa, eivätkä kuljettajakohtaiset aineistot jakautuneet tasaisesti eri vuodenajoille. Tätä ei kuitenkaan pidetty ongelmana, koska tutkimuksessa tapahtuma-aikaisesti seurattiin kosketuksia ja niistä syntyviä vaurioita. Olettamuksena oli, että kosketuksesta syntyvien vaurioiden syntyherkkyys on kuljettajasta riippumaton tapahtuma.

Tutkimusta suunniteltaessa oli tavoitteena kerätä rinnakkaisaineisto mallien pohjana olevalle työntutkimusaineistolle. Rinnakkaisaineistoa oli tarkoitus kerätä neljästä työntutkimuskuljettajasta ja lisäksi samoja koneita käyttävistä toisen vuoron kuljettajista. Tutkimusresurssit eivät kuitenkaan mahdollistaneet rinnakkaisaineiston keruuta. Jotta kuitenkin olisi saatu kuva työntutkimus-leimikoiden edustavuudesta, työntutkimuskuljettajilta ja kahdelta muulta kuljettajalta jälki-inventoitiin työntutkimusleimikoiden lisäksi yhteensä 9 leimikkoa. Niukkojen resurssien vuoksi päädyttiin subjektiiviseen valintaan, jossa mallien pohjaksi kerättiin mahdollisimman edustava aineisto kontrolliaineistosta tinkien.

5.5 Tutkimusaineisto

Tutkimusaineisto kerättiin vuosina 1993 - 1994. Tutkimus aloitettiin pienen esiaineiston keruulla, jolla selvitettiin tutkimusmenetelmän toimivuutta ja kehittämistarpeita. Esitutkimuksessa tutkimusmenetelmä todettiin toimivaksi.

Aineistoa kerättiin neljän kuljettajan työskentelystä. Tutkimuskoneet olivat urakoitsijoiden lukuun ottamatta Jämsänkosken Metsäoppilaitoksen hakkuukonetta, jota käytti koulun opettaja. Opettajan ammattitaito kuljettajana oli kohtuullinen, mutta jatkuvan työskentelyn antamaa rutiinia hänellä ei pitkistä käyttötauoista johtuen ollut.

Yhtä urakoitsijoiden koneista käytti omistaja, kahta muuta palkattu kuljettaja. Yhdellä näistä oli vuoden kokemus hakkuukoneen käytöstä, ja hänen ammattitaitonsa oli kohtuullinen. Kaksi muuta kuljettajaa oli työskennellyt hakkuukoneella useita vuosia, ja heidän ammattitaitonsa arvioitiin erinomaiseksi.

Tutkimusaineisto kerättiin Jämsänkosken, Kuhmoisten, Loimaan ja Rengon ympäristössä. Yhden kuljettajan osalta aineisto jäi vähäiseksi urakoitsijan muuttaessa Kuhmoisten ympäristöstä Oulun seudulle. Urakoitsijoiden hakkuukoneita käytettiin kahdessa vuorossa, jolloin oli mahdollista kerätä jälkiinventoinnin vertailuaineistoa myös toisen vuoron kuljettajista. Tätä aineistoa kerättiinkin kahdesta kuljettajasta, joista toisen ammattitaito arvioitiin kohtuulliseksi ja toisen hyväksi.

Seuranta-aineistoa kerättiin 15 leimikolta yhteispinta-alaltaan 14,69 ha. Aineisto käsitti 8192 runkoa, yhteistilavuudeltaan 1085,1 m^3. Aineistosta hakattiin talvella 586 m^3, kevät-syysaikana 288 m^3 ja kesällä 211 m^3. Kuusen osuus tutkimusleimikoissa oli 70 %. Lähtöpuusto oli keskimäärin 1169 runkoa/ha ja jäävä puusto 634 runkoa/ha.

Kuljettajittain aineisto jakautui epätasaisesti. Kuljettaja A hakkasi 1664 runkoa, 263,1 m^3, kuljettaja B 2911 runkoa, 435,5 m^3, kuljettaja C 465 runkoa, 71,2 m^3 ja kuljettaja D 3152 runkoa, 315,3 m^3.

Työntutkimusleimikoiden lisäksi jälki-inventoitiin yhteensä 9 vertailuleimikkoa kokonaispinta-alaltaan 5,86 ha. Nämäkin leimikot olivat kuusivaltaisia. Leimikoiden lähtöpuusto oli keskimäärin 1136 runkoa/ha ja jäävä puusto 614 runkoa/ha. Tarkemmat tiedot tutkimusleimikoista esitetään liitteessä 3 sivuilla 173 - 175.

6 Aineiston analysointi

Tutkimusaineisto jakautui epätasaisesti kuljettajittain. Kolmesta kuljettajasta saatiin riittäväksi katsottava aineisto, mutta yhden kuljettajan aineisto jäi varsin pieneksi. Aineiston käsittelyssä päädyttiin ratkaisuun, jossa kukin kuljettaja on mukana aineistonsa määrän edustamalla painolla. Näin toimittaessa kuljettaja,

jonka pieni aineisto sisälsi runsaasti epävarmuutta, ei vaikuttanut ratkaisevasti tuloksiin.

Työntutkimuksessa työn tuottavuutta ja työoloja kuvaavat tiedot kerättiin maastotietokoneelle, kosketustiedot ja kosketuspuiden jälkimittaustiedot vastaavasti paperilomakkeille. Maastotietokoneelta tiedot siirrettiin tekstitiedon kautta Excel-tiedostoiksi, jossa työn tuottavuutta ja työoloja kuvaavat tiedostot yhdistettiin. Tämän jälkeen kosketustiedot ja kosketuspuiden jälkimittaustiedot tallennettiin kohdistettuina niille havainnoille, joilla kosketukset olivat tapahtuneet. Jälki-inventoinnin puusto-, puustovaurio- ja ajouratiedot sekä leimikoiden yleistiedot kerättiin paperilomakkeille, joilta ne tallennettiin Excel-tiedostoihin. Aineisto laskettiin Systat ja SAS tilasto-ohjelmistoilla. Työn tuottavuutta kuvaavat regressiomallit ja puustovaurioiden ennustamisessa käytetyt logistiset mallit laskettiin SAS ohjelmistolla, jälki-inventoinnin tulokset vastaavasti Systatilla.

Työn tuottavuutta ja liiketyön määriä käsittelevissä osissa selvitetään työvaiheiden ajanmenekkiin ja liiketyön määriin vaikuttavia tekijöitä. Selitettävät muuttujat ovat kvantitatiivisia jatkuvia muuttujia, selittävät muuttujat joko kvantitatiivisia tai luokkamuuttujia. Tutkimustulokset esitetään regressiomalleina, joiden rakennetta ja selittävien muuttujien valintaa esitellään seuraavassa.

Käsillä olevassa tutkimuksessa ei ollut tavoitteena tuottavuutta ja liiketyön määriä kuvaavien yleismallien laatiminen. Tuottavuustutkimusten keskeinen ongelma on tuottavuuden suuri työntekijöiden välinen vaihtelu. Kun työtulokseen työntekijän lisäksi vaikuttavat monet työolotekijät, luotettavien yleismallien laatiminen vaatisi suuria aikatutkimusaineistoja.

Tutkimuksen tärkeimpänä tavoitteena oli puustovaurioiden määrän ja siihen vaikuttavien tekijöiden selittäminen. Tuottavuutta ja liiketyön määriä tarkasteltaessa keskeinen tavoite olikin löytää tuottavuuteen ja liiketyön määriin vaikuttavat tekijät ja niiden mahdolliset yhteydet korjuujälkeen sekä kuvata eri tutkimuskuljettajien työtapaa.

Jos jokaiselle kuljettajalle ja puulajille olisi laadittu omat mallinsa, mallien kokonaismäärä olisi noussut suureksi. Eri tekijöiden vaikutusten vertailu olisi ollut hankalaa mallien suuren määrän vuoksi, ja yksittäisten mallien informaatioarvo olisi ollut verraten pieni.

Edellä mainituista syistä johtuen mallien laadinnassa on käytetty valemuuttujatekniikkaa. Jos halutaan esimerkiksi kuvata tuottavuutta y kolmella tutkimuskuljettajalla A, B ja C, tarvitaan kaksi valemuuttujaa (engl. dummy variables, indicator variables) x_2 ja x_3 yhdistämään näiden kolmen kuljettaja tasot (Montgomery & Peck 1992, s. 239). Valemuuttujien tasot ovat tällöin seuraavat:

x_2	x_3	
0	0	jos kuljettaja on A
1	0	jos kuljettaja on B
0	1	jos kuljettaja on C

Regressiomalli on tällöin

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \beta_3 x_3 + \varepsilon \qquad (5)$$

Yleisesti luokkamuuttujaa, jolla on a tasoa, kuvaamaan tarvitaan a - 1 valemuuttujaa, joista kukin saa arvot 0 ja 1.

Eräs mallin laadinnan ongelmista on selittävien muuttujien valinta. Montgomery & Peck (1992, s. 265) näkevät kaksi ristiriitaista päämäärää valittaessa malliin mukaan otettavia selittäjiä koko mahdollisesta selittäjäjoukosta. Mallin haluttaisiin sisältävän niin monta selittäjää kuin mahdollista, jotta näiden selittäjien informaatiosisältö olisi käytettävissä selittämään selitettävän muuttujan arvoa y. Toisaalta mallin haluttaisiin sisältävän niin vähän selittäjiä kuin mahdollista, koska ennusteen $\hat{y}$ varianssi kasvaa selittäjien määrän lisääntyessä. Selittävien muuttujien määrän lisääntyminen nostaa usein myös aineiston keruukustannuksia. Montgomeryn & Peckin mukaan selittävien muuttujien valintaan ei olekaan mitään yleisratkaisua.

Muuttujien valintaan on käytettävissä vaihtoehtoisia tekniikoita. Eräs vaihtoehto on laskea kaikki mahdolliset regressiot. Jos vakiotermi on mukana kaikissa yhtälöissä, ja selittäviä muuttujia on n kappaletta, tarkasteltavia yhtälöitä olisi 2^n kappaletta (Montgomery & Peck 1992, s. 276). Jos selittäviä muuttujia on 10, regressioyhtälövaihtoehtoja olisi 2^{10} eli 1024 kappaletta. Tarkasteltavien vaihtoehtojen määrä kasvaa nopeasti mahdollisten selittävien muuttujien määrän lisääntyessä.

Askeltava regressioanalyysi on paljon käytetty menetelmä muuttujien valinnassa. Siitä on olemassa erilaisia versioita. Askeltava regressioanalyysi voidaan suorittaa eteenpäin (engl. forward selection) tai taaksepäin (engl. backward elimination). Jos mallin sovitus tehdään eteenpäin, malliin tuodaan selittävät muuttujat siinä järjestyksessä, että ne kasvattavat selitysastetta R^2 mahdollisimman paljon. Mukaan tuodaan siis t-arvoltaan suurimmat muuttujat.

Taaksepäin valittaessa aineistoon sovitetaan ensin kaikki muuttujat sisältävä malli. Tästä poistetaan aina pienimmän t-testiarvon omaava selittäjä. Selittäjän poistamisen jälkeen mallin kertoimet estimoidaan ja menettelyä jatketaan, kunnes kaikkien selittävien muuttujien t-arvot ovat riittävän suuret. Muuttuja, joka on jo ollut putoamassa mallista, saattaakin pysyä mukana lopulliseen malliin asti, jos mallista putoaa samaa asiaa selittävä muuttuja (Ranta ym. 1989, s. 422).

Montgomery & Peck (1992, s. 297) pitävät taaksepäin askeltavaa tekniikkaa eteenpäin askeltavaa parempana. Eteenpäin askellettaessa saattaa tapahtua siten, että jo alkuvaiheessa mukaan tulleen muuttujan selitysvoima ei täyttäisi mukaan tulevan muuttujan kriteerejä, kun malliin myöhemmissä askeleissa lisättäisiin muuttujia, joilla on interkorrelaatio kyseisen muuttujan kanssa.

Askeltava regressioanalyysi vaatii käyttäjältään varovaisuutta ja tietoa selittävien muuttujien suhteista. Eräs vaihtoehto muuttujien valintaan onkin se, että askeltavalla tekniikalla haetaan malliin mahdollisesti mukaan tulevien muuttujien ryhmä. Tämän jälkeen kokeillaan näiden muuttujien kaikki mahdolliset yhdistelmät. Käsillä olevassa tutkimuksessa muuttujien valinnassa on käytetty taaksepäin askeltavaa tekniikkaa, jolla on saatu selville mukaan tulevien muuttujien kehikko. Tämän jälkeen on tutkittu näiden muuttujien vaikutuksia ja valittu lopullinen malli. Koska tutkimusaineisto oli verraten suuri, tulivat selitysvoimaltaan verraten vähäisetkin tekijät usein mukaan malleihin askeltavassa analyysissa. Tutkijan tehtäväksi jäi päättää, oliko näillä selittäjillä todellisista itsenäistä selitysvoimaa.

Mallien sopivuutta tarkasteltaessa kiinnitettiin huomiota selitysasteeseen ja jäännöshajontaan RMSE (engl. root mean square error). Steel & Torrien (1981, s. 276, 327) mukaan selitysasteesta käytetään merkintää r^2 (engl. coefficient of determination), jos selittäviä muuttujia on yksi. Kun selittäviä muuttujia on useita, selitysasteen merkintänä on R^2 (engl. coefficent of multiple determination). Luokkamuuttujien (esimerkiksi kuljettaja, puulaji, puun ottokulma ja käsittelypuoli) eroja tutkittiin varianssi- ja kovarianssianalyyseilla ja näiden jälkeisillä korjattujen keskiarvojen parittaisilla vertailuilla. Kovariaattina käytettiin käsiteltävän rungon kokoa, dm^3, runkojen keskikoon poiketessa selvästi luokkien välillä. Joissakin tapauksissa, esimerkiksi tarkasteltaessa puun käsittelypaikan vaikutusta ajanmenekkiin, tarkastelu rajattiin yhteen puulajiin, jolloin käsittelypuolten mahdollisia ajanmenekkieroja testattiin kuljettajittain t-testeillä.

Puustovaurioiden ennustamiseksi laadittiin malleja, joissa selitettiin kosketusten määrää ja toisaalta vaurioiden syntyä kosketuksista. Tällöin vastemuuttuja ei olekaan jatkuva, vaan binäärinen saaden arvon 1 tai 0. Kvantitatiivisen mallin perusoletus virhevaihtelun normaalijakautuneisuudesta ei ole tällöin voimassa. Logistiset regressiomallit tarjoavat tällaisissa tapauksissa mahdollisuuden vastemuuttujan ennustamiseen. Perusteita logistisen regression käytölle ja mallien tulkintaa esitellään luettavuuden helpottamiseksi puustovaurioiden määrän ennustamista esittelevässä luvuissa 7.3.2 ja 7.3.3 sivuilla 105 - 110.

7 Tutkimustulokset

7.1 Työn tuottavuus ja siihen vaikuttavat tekijät

7.1.1 Tuottavuus tutkimusleimikoissa

Tutkimustuloksista esitetään ensin työn tuottavuus ja liiketyön määrät sekä niihin vaikuttavat tekijät. Näin pyritään lukijalle esittelemään tutkimuskuljettajat heidän työnsä tuottavuuden ja työtapansa kautta, ja luomaan pohjaa myöhemmin esitettäville korjuujälkituloksille.

Työn tuottavuutta seurattiin kuljettajien tuottavuustasojen ja niihin vaikuttavien tekijöiden selvittämiseksi. Tuottavuuden tutkimus nivoutui tutkimuksessa hakkuutyön analyysiin, jota tarvittiin myös puustovaurioiden synnyn seurannassa. Mallittamisen lähtökohtana oli selvittää tuottavuuteen vaikuttavia tekijöitä ja mahdollisia kuljettajakohtaisia eroja. Aineiston rajallisuuden vuoksi hakkuutyötä kuvaavien yleismallien laadinta ei ollut mahdollista.

Taulukko 3. Hakkuutyön tuottavuus tutkimusleimikoissa.

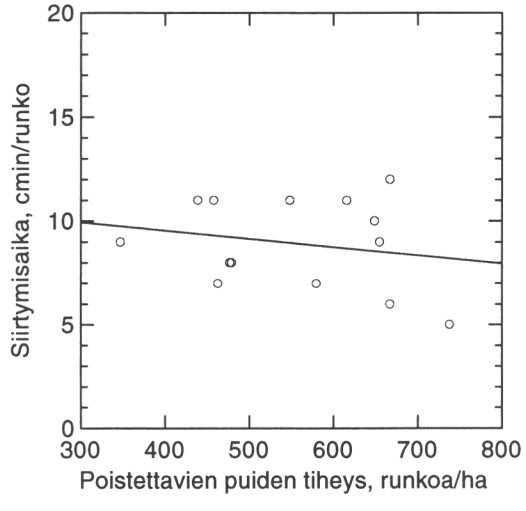
Leimikko	Rungon koko, dm^3	Kertymä, m^3 /ha	Tuottavuus, m^3/h_0
Kulj. A			
1	189	93,3	18,45
2	173	91,3	17,76
3	143	57,0	14,87
Kaikki	160	71,6	16,41
Kulj. B			
1	149	74,6	7,46
2	106	88,9	6,47
3	158	98,1	10,08
4	146	93,3	8,06
5	210	87,2	11,34
Kaikki	154	88,8	8,76
Kulj. C			
1	141	70,2	7,83
2	199	106,2	13,32
Kaikki	164	83,8	9,75
Kulj. D			
1	90	46,8	10,73
2	102	42,8	11,89
3	87	66,6	11,55
4	129	65,1	14,37
5	84	65,2	10,84
Kaikki	101	59,9	12,34
Koko aineisto	135	73,9	11,00

Kuljettajakohtaisia ja koko aineiston tuloksia laskettaessa jokainen leimikko ja kuljettaja ovat mukana aineistonsa määrän edustamalla painolla. Laskennassa on menetelty vastaavasti myös muualla tässä tutkimuksessa laskettaessa kuljettaja- ja aineistokohtaisia tuloksia. Taulukossa 3 on esitetty hakkuutyön tuottavuus tutkimusleimikoittain ja kuljettajittain.

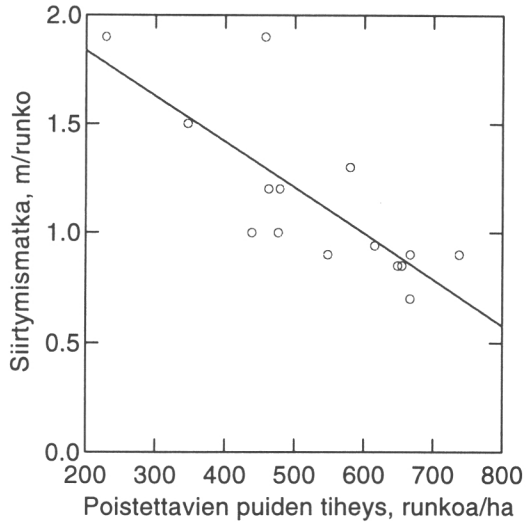
7.1.2 Työvaiheiden tehoajanmenekit

Siirtyminen käsitti hakkuukoneen siirtymisen työpisteestä toiseen. Työvaihe alkoi koneen lähtiessä liikkeelle ja päättyi, kun hakkuulaitetta ryhdyttiin viemään kaadettavalle puulle. Siirtymisessä ei ole kyse pelkästään ajonopeudesta, sillä usein siirtymisaikana kuljettaja suunnittelee työtä. Hakkuukonetyössä on myös paljon sellaista peruskoneen liikettä, jota tässä tutkimuksessa ei katsottu siirtymiseksi. Puita käsiteltäessä ja kaadettaessa kone liikkuu usein lyhyitä matkoja paremman työtilan saamiseksi. Siirtymisen katsottiin tapahtuneen koneen kuljettua yhtäjaksoisesti yli 2 m, jolloin myös työpiste muuttui. Tutkimuksessa esitettävät siirtymisajat eivät siis sisällä kaikkea peruskoneen liikkeelläoloaikaa; liikettä sisältyy myös puun kaato- tai käsittelyaikoihin.

Tutkimusleimikot olivat maastoluokkaa 1 ja 2. Lumen määrä talvileimikoilla oli yhtä leimikkoa lukuun ottamatta vähäinen. Keskimääräinen ajonopeus siirtymisajossa koko aineistossa oli 12,9 m/min. Kuvissa 10 ja 11 esitetään poistettavan puuston tiheyden (runkoa/ha) vaikutus siirtymisaikaan (cmin/runko) ja siirtymismatkaan (m/runko).



Kuva 10. Poistettavan puuston tiheyden vaikutus siirtymisaikaan, cmin/runko. $y = 11{,}133 - 0{,}004 * x$, $r^2 = 0{,}043$



Kuva 11. Poistettavan puuston tiheyden vaikutus siirtymismatkaan, m/runko. $y = 2{,}259 - 0{,}002 * x$, $r^2 = 0{,}613$

Hakkuulaitteen vienti ja puun kaato käsitti hakkuulaitteen viennin ja asettelun puun tyvelle sekä puun katkaisun siihen asti, kunnes puuta ryhdyttiin siirtämään tai karsimaan. Työvaiheen ajanmenekkiä kuvaa taulukossa 4 esitettävä regressiomalli. Rungon koon vaikutus hakkuulaitteen viennin ja puun kaadon ajanmenekkiin esitetään kuljettajittain ja koko aineistossa kuvassa 12.

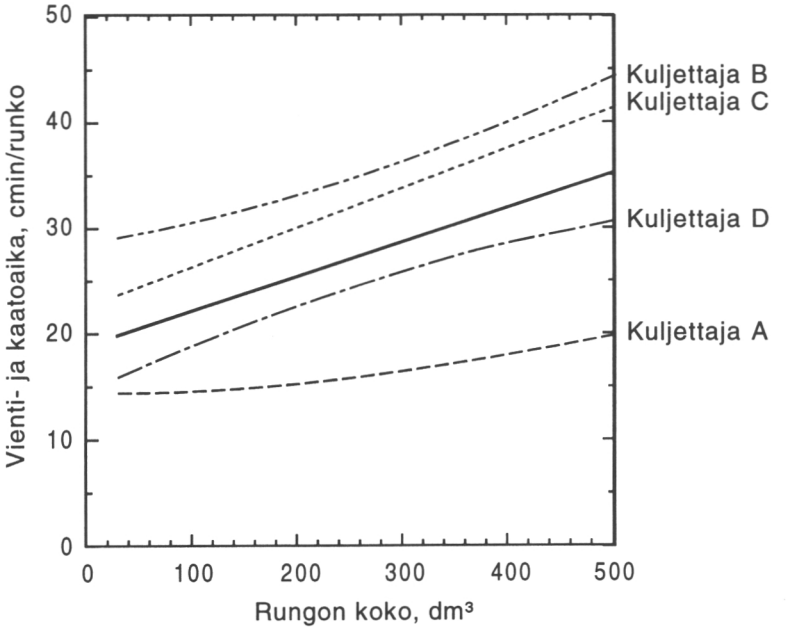
Taulukko 4. Hakkuulaitteen viennin ja puun kaadon ajanmenekkiä kuvaava regressiomalli. Perustasona kuljettaja D ja ottokulma 2. Ottokulmat: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti sivulta, 2 = otto kohtisuoraan sivulta.

$$y = a + bx_1 + cx_2 + dx_3 + e_1k_1 + e_2k_2 + e_3k_3 + f_1o_1 + f_2o_2 \qquad (6)$$

missä
y = viennin ja kaadon ajanmenekki, cmin
x_1 = rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä työalueella, kpl/ha
x_3 = ottoetäisyys, m
k_1= valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
o_1 = valemuuttuja =1, jos ottokulma = 0, muulloin 0
o_2 = valemuuttuja =1, jos ottokulma = 1, muulloin 0

a = vakio
b, c,.... f_2 = muuttujien kertoimet

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	Pr>ITI
a	11,799	0,9298	12,69	0,0001
b	0,030	0,0012	23,93	0,0001
c	0,002	0,0003	5,33	0,0001
d	0,471	0,0968	4,86	0,0001
e_1	-4,169	0,4693	-8,88	0,0001
e_2	12,255	0,4004	30,61	0,0001
e_3	8,322	0,7796	10,68	0,0001
f_1	-2,947	0,4580	-6,43	0,0001
f_2	-0,924	0,4517	-2,05	0,0409
		n = 7964	$R^2 = 0,229$	RMSE = 15,06



Kuva 12. Rungon koon vaikutus hakkuulaitteen viennin ja puun kaadon ajanmenekkiin. Alla kuvaajien yhtälöt.

Kuljettaja	*Kuvaajan yhtälö*	r^2
A	$y = 14,482 + 0,00014 * x + 0,00002 * x^2$	*0,090*
B	$y = 28,392 + 0,015 * x + 0,00003 * x^2$	*0,068*
C	$y = 22,568 + 0,036 * x$	*0,070*
D	$y = 15,007 + 0,042 * x - 0,00002 * x^2$	*0,065*
Koko aineisto	$y = 19,035 + 0,032 * x$	*0,067*

Kaadettavan rungon koko, dm^3, ja kuljettaja olivat tutkimusaineistossa tärkeimmät hakkuulaitteen viennin ja puun kaadon ajanmenekkiä selittävät tekijät. Kuljettaja A:n ajanmenekki oli hieman perustasona olevan kuljettaja D:n ajanmenekkiä pienempi. Kuljettajien B ja C ajanmenekkitasot olivat selvästi suuremmat kuin kuljettajilla A ja D. Puiden lukumäärän ja ottoetäisyyden lisääntyminen kasvattivat työvaiheen ajanmenekkiä. Urapuiden otto oli nopeampaa kuin viistosti sivulta otettujen puiden, joiden ajanmenekki puolestaan oli kohtisuoraan sivulta otettujen puiden ajanmenekkiä pienempi.

Regressioyhtälön selitysaste on 0,229. Alhaiset selitysasteet ovat kuitenkin ominaisia työvaiheelle hakkuulaitteen vienti ja puun kaato. Selitysasteitten vertailua muihin tutkimuksiin vaikeuttaa se, ettei tutkimusjulkaisuissa useinkaan ole ilmoitettu yhtälöitten selitysasteita. Tuftsin (1997, s. 41) hakkuukonetutkimuksessa työvaiheen ajanmenekki kuitenkin ilmoitettiin. Ajanmenekkiä selittivät puun läpimitta, ottoetäisyys ja ottokulma selitysasteen R^2 ollessa 0,276.

Karsinta ja katkonta käsitti rungon karsinnan ja katkonnan sekä samassa yhteydessä tehtävän kasauksen. Työvaiheen ajanmenekkiä kuvaa taulukossa 5 esitettävä malli.

Taulukko 5. Karsinnan ja katkonnan ajanmenekkiä kuvaava regressiomalli. Perustasoina kuljettaja D, puulaji kuusi ja käsittelypuoli 2. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

$$y = a + bx_1 + +c_1k_1 + c_2k_2 + c_3k_3 + d_1l_1 + d_2l_2 + e_1p_1 + e_2p_2 + f_1 k_1 x_1 + f_2k_2x_1 + f_3k_3x_1 + g_1l_1x_1 + g_2l_2x_1 \quad (7)$$

missä
y = karsinta-katkonta-aika, cmin
x_1= rungon koko, dm^3
k_1= valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuutttuja,=1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
l_1= valemuuttuja, =1, jos puulaji = mänty, muulloin 0
l_2 = valemuuttuja, =1, jos puulaji = koivu, muulloin 0
p_1= valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 0, muulloin 0
p_2 = valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 1, muulloin 0

a = vakio
b, c_1,.... g_2 = muuttujien kertoimet

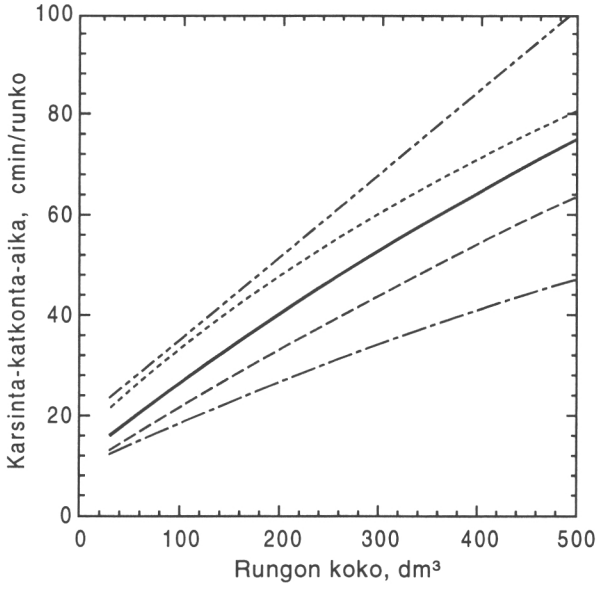
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	Pr>ITI
a	14,042	0,6449	21,77	0,0001
b	0,068	0,0032	21,39	0,0001
c_1	-0,653	0,7828	-0,83	0,4040
c_2	8,874	0,6954	12,76	0,0001
c_3	9,096	1,3464	6,76	0,0001
d_1	2,099	0,7003	3,00	0,0027
d_2	-10,148	1,1590	-8,76	0,0001
e_1	-3,227	0,5334	-6,05	0,0001
e_2	-1,968	0,4932	-3,99	0,0001
f_1	0,038	0,0041	9,19	0,0001
f_2	0,087	0,0039	22,36	0,0001
f_3	0,085	0,0066	12,93	0,0001
g_1	-0,002	0,0037	-0,42	0,6762
g_2	0,150	0,0062	24,13	0,0001
		n = 7707	$R^2 = 0,630$	RMSE = 17,06

Kuljettajan, puulajin ja puun käsittelypuolen vaikutusta karsinnan ja katkonnan runkokohtaiseen ajanmenekkiin selvitettiin kovarianssianalyysilla ja sen jälkeisillä luokkamuuttujien korjattujen keskiarvojen (adjusted least square means) parittaisilla vertailuilla (liite 4.1, s. 176). Kovariaattina oli käsiteltävän rungon koko, dm^3. Karsinta-katkonnan ajanmenekin korjattu puukohtainen keskiarvo kuljettajalla A oli 29,87 cmin, kuljettajalla B 46,02 cmin, kuljettajalla C 45,97 cmin ja kuljettajalla D 25,46 cmin. Keskiarvojen parittaisissa vertailussa kuljettajakohtaiset ajanmenekit poikkesivat merkitsevästi toisistaan vertailuparia B ja C lukuun ottamatta. Kuljettajien välisiä eroja kuvastaa kuvassa 13 esitettävä kuusirungon koon vaikutus karsinta-katkonnan ajanmenekkiin.

Koivun karsinta-katkonta-ajat olivat männyn ja kuusen aikoja suuremmat. Erityisesti suurten koivujen karsinta oli selvästi hitaampaa kuin havupuiden. Karsinta-katkonta aikojen korjatut keskiarvot olivat männyllä 34,75 cmin, kuusella 32,85 cmin ja koivulla 42,90 cmin. Parittaisissa vertailuissa kaikkien puulajien karsinta-katkonta-aikojen korjatut keskiarvot erosivat merkitsevästi toisistaan.

Käsittelypuoli vaikutti karsinta-katkonta-aikoihin. Kaikkien kolmen käsittelypuolen karsinta-katkonta-aikojen korjatut keskiarvot erosivat parittaisissa vertailuissa toisistaan. Urapuiden karsinta-katkonta-aika oli keskimäärin 35,34 cmin, ottopuolella uraa käsiteltyjen 36,60 cmin ja yli uran tuotujen 38,57 cmin.

Karsinta-katkonnan ajanmenekkiä kuvaavan yhtälön selitysaste R^2 oli 0,630. Tuftsin (1997) tutkimuksessa karsinta-katkonnan ajanmenekkiä selittivät rungon koko, rungosta tehtävien pölkkyjen lukumäärä, ottoetäisyys ja ottokulma sekä rungon kaupallisen osan pituus. Yhtälön selitysaste Tuftsilla (1997, s. 42) oli 0,615.



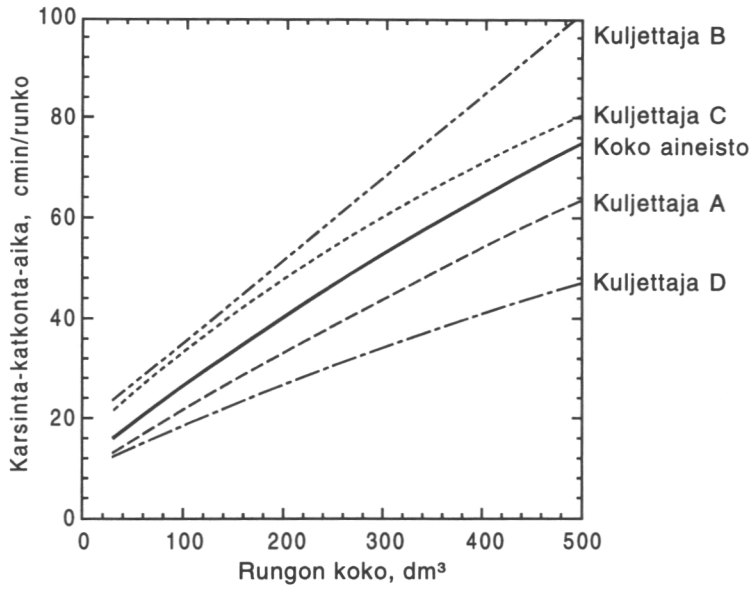
Kuva 13. Kuusirungon koon vaikutus karsinnan ja katkonnan ajanmenekkiin koko aineistossa ja kuljettajittain. Alla kuvaajien yhtälöt.

Kuljettaja	*Kuvaajan yhtälö*	r^2
A	$y = 10{,}414 + 0{,}123 * x - 0{,}00003 * x^2$	*0,671*
B	$y = 20{,}459 + 0{,}160 * x$	*0,504*
C	$y = 18{,}273 + 0{,}170 * x - 0{,}00009 * x^2$	*0,394*
D	$y = 11{,}154 + 0{,}090 * x - 0{,}00004 * x^2$	*0,478*
Koko aineisto	$y = 13{,}259 + 0{,}145 * x - 0{,}00004 * x^2$	*0,449*

Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvaa taulukossa 6 esitettävä malli.

Taulukko 6. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvaava malli. Perustasoina kuljettaja D, puulaji kuusi ja käsittelypuoli 2. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

$$y = a + bx_1 + +c_1k_1 + c_2k_2 + c_3k_3 + d_1l_1 + d_2l_2 + e_1p_1 + e_2p_2 + f_1 k_1 x_1 + f_2k_2x_1 + f_3k_3x_1 + gx_2 + hx_3 \quad (8)$$



Kuva 13. Kuusirungon koon vaikutus karsinnan ja katkonnan ajanmenekkiin koko aineistossa ja kuljettajittain. Alla kuvaajien yhtälöt.

Kuljettaja	*Kuvaajan yhtälö*	r^2
A	$y = 10{,}414 + 0{,}123 * x - 0{,}00003 * x^2$	*0,671*
B	$y = 20{,}459 + 0{,}160 * x$	*0,504*
C	$y = 18{,}273 + 0{,}170 * x - 0{,}00009 * x^2$	*0,394*
D	$y = 11{,}154 + 0{,}090 * x - 0{,}00004 * x^2$	*0,478*
Koko aineisto	$y = 13{,}259 + 0{,}145 * x - 0{,}00004 * x^2$	*0,449*

Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvaa taulukossa 6 esitettävä malli.

Taulukko 6. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvaava malli. Perustasoina kuljettaja D, puulaji kuusi ja käsittelypuoli 2. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

$$y = a + bx_1 + +c_1k_1 + c_2k_2 + c_3k_3 + d_1l_1 + d_2l_2 + e_1p_1 + e_2p_2 + f_1 k_1 x_1 + f_2k_2x_1 + f_3k_3x_1 + gx_2 + hx_3 \quad \textbf{(8)}$$

missä
y = runkokohtainen tehoaika, cmin
x_1 = rungon koko, dm^3
k_1 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
l_1 = valemuuttuja, = 1, jos puulaji = mänty, muulloin 0
l_2 = valemuuttuja, = 1, jos puulaji = koivu, muulloin 0
p_1 = valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 0, muulloin 0
p_2 = valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 1, muulloin 0
x_2 = ottoetäisyys, m
x_3 = puiden lukumäärä/ha työalueella

a = vakio
b, c_1,.... h = muuttujien kertoimet

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	Pr>ITI
a	21,801	1,5198	14,34	0,0001
b	0,103	0,0044	23,41	0,0001
c_1	-2,242	1,0963	-2,05	0,0409
c_2	19,943	0,9811	20,33	0,0001
c_3	16,502	1,9028	8,67	0,0001
d_1	4,258	0,7114	5,99	0,0001
d_2	10,302	1,1963	8,61	0,0001
e_1	-5,496	0,7708	-7,13	0,0001
e_2	-1,937	0,7185	-2,70	0,0070
f_1	0,029	0,0057	5,11	0,0001
f_2	0,102	0,0055	18,59	0,0001
f_3	0,090	0,0093	9,67	0,0001
g	0,825	0,1478	5,58	0,0001
h	0,002	0,0006	3,62	0,0003
		n = 7695	R^2 = 0,591	RMSE = 24,08

Rungon koko ja kuljettaja olivat tärkeimmät tehoajanmenekkiä selittävät tekijät. Tehoajanmenekin korjattu keskiarvo kuljettajalla A oli 46,21 cmin, kuljettajalla B 78,06 cmin, kuljettajalla C 73,07 cmin ja kuljettajalla D 44,52 cmin. Korjattujen keskiarvojen parittaisissa vertailuissa kuljettajien A ja D tehoajanmenekit poikkesivat merkitsevästi kuljettajien B ja C tehoajanmenekeistä. Myös kuljettajien B ja C tehoajanmenekit poikkesivat merkitsevästi toisistaan. Sen sijaan kuljettajien A ja D tehoajanmenekit eivät poikenneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan.

Runkokohtaiset tehoajat koivun osalta olivat selvästi suuremmat kuin männyn ja kuusen. Runkokohtaisen tehoajan korjattu keskiarvo oli männyllä 59,87

cmin, kuusella 55,61 cmin ja koivulla 65,91 cmin. Puulajien tehoajat poikkesivat kaikki merkitsevästi toisistaan parittaisissa vertailuissa.

Käsittelypuoli vaikutti tehoaikoihin. Ajourapuilla runkokohtainen tehoaika oli keskimäärin 57,45 cmin, ottopuolella uraa käsiteltyjen 61,01 cmin ja uran yli tuotujen puiden 62,94 cmin. Urapuiden käsittely erosi parittaisissa vertailuissa muista ryhmistä. Ottopuolella uraa käsiteltyjen ja yli uran tuotujen puiden tehoaikojen vertailussa p-arvo oli 0,007.

Kovarianssianalyysi puulajin, kuljettajan, käsittelypuolen, ottoetäisyyden, puiden lukumäärän työalueella ja rungon koon vaikutuksesta runkokohtaiseen tehoajanmenekkiin sekä ajanmenekin sovitettujen keskiarvojen parittaiset vertailut esitetään taulukkoina liitteessä 4.2 sivulla 177.

Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvaavan yhtälön selitysaste oli 0,591. Tuftsin & Brinkerin (1993, s. 28) hakkuukonetutkimuksessa runkokohtaista tehoaikaa kuvaavat yhtälöt laskettiin erikseen tutkimuskuljettajina olleille suomalaiselle ja amerikkalaiselle kuljettajalle. Selittäjinä yhtälöissä olivat rungon koko ja rungosta valmistettujen pölkkyjen lukumäärä. Yhtälön selitysaste suomalaisella kuljettajalla oli 0,529, amerikkalaisella vastaavasti 0,507. Tuftsin (1997, s. 42) tutkimuksessa työvaiheen ajanmenekkiä selittivät rungon koko, rungosta valmistettujen pölkkyjen lukumäärä, ottoetäisyys, ottokulma sekä rungon kaupallisen osan pituus yhtälön selitysasteen ollessa 0,611.

Uralle saatavaan havutukseen, joka saattaa estää raiteenmuodostusta metsäkuljetuksessa, voidaan vaikuttaa käsittelypuolen valinnalla. Viistosti tai kohtisuoraan sivulta otettujen kuusien käsittelypuolen vaikutusta tehoajanmenekkiin tutkittiin kuljettajittain t-testeillä (taulukko 7). Nollahypoteesina oli, että tehoajanmenekit ovat käsittelypuolittain yhtä suuret.

Taulukko 7. Kuljettajakohtaiset t-testit käsittelypuolen vaikutuksesta runkokohtaiseen tehoaikaan kuusella viistosti tai kohtisuoraan sivulta otetuilla puilla. Käsittelypuolet: 1 = käsittely ottopuolella uraa, 2 = vienti uran yli.

Kuljettaja	Käsittely-puoli	N	Tehoajan keskiarvo, cmin	Tehoajan keskihajonta, cmin	p-arvo
A	1	503	44,59	30,92	0,277
	2	460	42,75	21,10	
B	1	655	73,79	42,94	0,273
	2	726	76,19	37,79	
C	1	92	74,71	28,20	0,101
	2	100	67,75	30,34	
D	1	1139	38,36	17,68	0,110
	2	266	40,77	22,96	

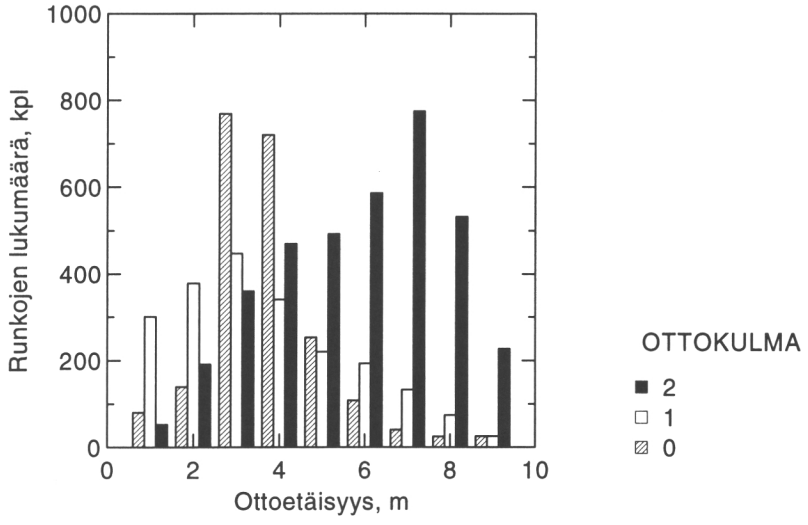
T-testin tulosten mukaan tehoajat eivät eronneet käsittelypuolittain merkitsevästi toisistaan yhdenkään kuljettajan kohdalla. Uralle saatiin siten kohtuullinen havutus ilman merkittävää ajanmenekkilisää. Kuljettaja D:n työtapa käsittelypuolen suhteen poikkesi selvästi muista kuljettajista, joilla puolestaan käsittelypuolen jakaumat olivat lähes samanlaiset. Kuljettaja D otti muita kuljettajia enemmän puita kohtisuoraan sivulta.

Viistosti sivulta otetuista puista 42,7 % vietiin uran yli, kun taas kohtisuoraan sivulta otetuista vastaava %-osuus oli 33,0. Tämä johtunee kohtisuoraan sivulta otettujen keskimäärin suuremmasta ottoetäisyydestä. Ottoetäisyyksien jakaumat ottokulmittain esitetään kuvassa 14. Kuljettajittain viistosti tai kohtisuoraan sivulta otetut puut jakautuivat käsittelypuolittain taulukon 8 mukaisesti.

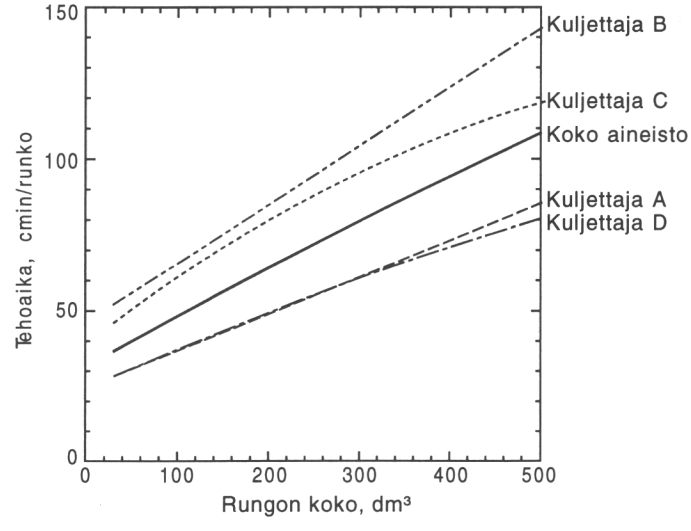
Ottoetäisyyden kasvu samoin kuin puiden lukumäärän lisääntyminen työalueella lisäsivät runkokohtaista tehoajanmenekkiä ottoetäisyyden ollessa niistä merkittävämpi selittäjä. Rungon koon ja kuljettajan yhdysvaikutus selitti tutkimusaineistossa runkokohtaista tehoajanmenekkiä. Kuljettajilla B ja C, joiden runkokohtaiset tehoajat olivat perustasoa suuremmat, rungon koon kasvu lisäsi ajanmenekkiä enemmän kuin kuljettajilla A ja D. Kuljettajien välisiä tasoeroja kuvaa myös kuvassa 15 esitetty kuusirungon koon vaikutus tehoajanmenekkiin.

Taulukko 8. Viistosti ja kohtisuoraan sivulta otettujen puiden jakaututuminen käsittelypuolen mukaan. Käsittelypuolet: 1 = käsittely ottopuolella uraa, 2 = vienti uran yli.

Kuljettaja	Käsittelypuoli	Otto viistosti sivulta	Otto kohtisuoraan sivulta
A	1	53,8	50,8
	2	46,2	49,2
B	1	45,7	50,9
	2	54,3	49,1
C	1	43,4	57,4
	2	56,6	42,6
D	1	70,6	88,3
	2	29,4	11,7
Kaikki	1	57,3	67,0
	2	42,7	33,0



Kuva 14. Eri etäisyyksiltä otettujen runkojen määrät ottokulmittain. Ottokulmat: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti sivulta, 2 = otto kohtisuoraan sivulta.



Kuva 15. Kuusirungon koon vaikutus runkokohtaiseen tehoajanmenekkiin koko aineistossa ja kuljettajittain. Alla kuvaajien yhtälöt.

Kuljettaja	*Kuvaajan yhtälö*	r^2
A	$y = 25{,}100 + 0{,}119 * x$	*0,626*
B	$y = 47{,}569 + 0{,}189 * x$	*0,417*
C	$y = 40{,}313 + 0{,}222 * x - 0{,}00014 * x^2$	*0,337*
D	$y = 25{,}767 + 0{,}130 * x - 0{,}00005 * x^2$	*0,387*
Koko aineisto	$y = 32{,}480 + 0{,}169 * x - 0{,}00004 * x^2$	*0,362*

Taulukko 9. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuusen hakkuussa kuvaava malli.

$$y = a + bx + cx^2 \quad (9)$$

missä
y = runkokohtainen tehoaika, cmin/runko
x = rungon koko, dm^3

a = vakio
b, c = muuttujien kertoimet

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	Pr>ITI
a	32,480	0,6816	47,6524	0,00001
b	0,169	0,0062	27,0972	0,00001
c	-0,000037	0,000008	-4,3947	0,00001
			n = 5511	$r^2 = 0,362$

Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuvataan usein malleilla, joissa selittävänä tekijänä on pelkästään rungon koko. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä kuusen osalta kuvaa taulukossa 9 esitettävä malli.

Edellisen mallin vertailu muissa tutkimuksissa saatuihin malleihin antaa jonkinlaisen kuvan käsillä olevan tutkimuksen tutkimuskuljettajien tuottavuustasoista ja siten myös tulosten yleistettävyydestä. Mallin antamat tulokset ovat tasoltaan lähellä Rummukaisen ym. (1993, s. 21) esittämän mallin (malli 1, s. 43) antamaa tasoa. Käsillä olevan tutkimuksen tutkimuskuljettajat edustanevat siten kokonaisuutena hakkuukoneen kuljettajien keskitasoa.

Runkokohtaiseen kokonaisaikaan laskettiin tehoaikaan sisältyvien työvaiheiden lisäksi siirtymiset jaettuna työmaakohtaisesti tasasuuruisena kaikille ainespuumitan täyttäville rungoille, pölkkyjen ja hakkuutähteiden järjestely sekä raivaus.

Runkokohtaista kokonaisaikaa kuvaa taulukossa 10 esitettävä malli.

Taulukko 10. Runkokohtaista kokonaisajanmenekkiä kuvaava malli. Perustasoina kuljettaja D, puulaji kuusi ja käsittelypuoli 2. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

$$y = a + bx_1 + +c_1k_1 + c_2k_2 + c_3k_3 + d_1l_1 + d_2l_2 + e_1p_1 + e_2p_2 + f_1 k_1 x_1 + f_2k_2x_1 + f_3k_3x_1 + gx_2 + hx_3 \quad (10)$$

missä
y = runkokohtainen kokonaisaika, cmin
x_1 = rungon koko, dm^3
k_1 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
l_1 = valemuuttuja, = 1, jos puulaji = mänty, muulloin 0
l_2 = valemuuttuja, = 1, jos puulaji = koivu, muulloin 0
p_1 = valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 0, muulloin 0
p_2 = valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 1, muulloin 0
x_2 = ottoetäisyys, m
x_3 = puiden lukumäärä/ha työalueella

a = vakio
b, c_1,....h = muuttujien kertoimet

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	Pr>ITI
a	30,814	1,9461	15,83	0,0001
b	0,109	0,0056	19,44	0,0001
c_1	-2,085	1,4038	-1,49	0,1376
c_2	33,932	1,2563	27,01	0,0001
c_3	30,506	2,4365	12,52	0,0001
d_1	0,416	0,9110	0,46	0,6479
d_2	13,291	1,5319	8,68	0,0001
e_1	- 4,443	0,9869	-4,50	0,0001
e_2	- 1,307	0,9201	-1,42	0,1547
f_1	0,030	0,0074	4,04	0,0001
f_2	0,101	0,0070	14,41	0,0001
f_3	0,067	0,0119	5,65	0,0001
g	0,898	0,1892	4,75	0,0001
h	0,003	0,0007	3,88	0,0001
		n = 7695	$R^2 = 0,550$	RMSE = 30,83

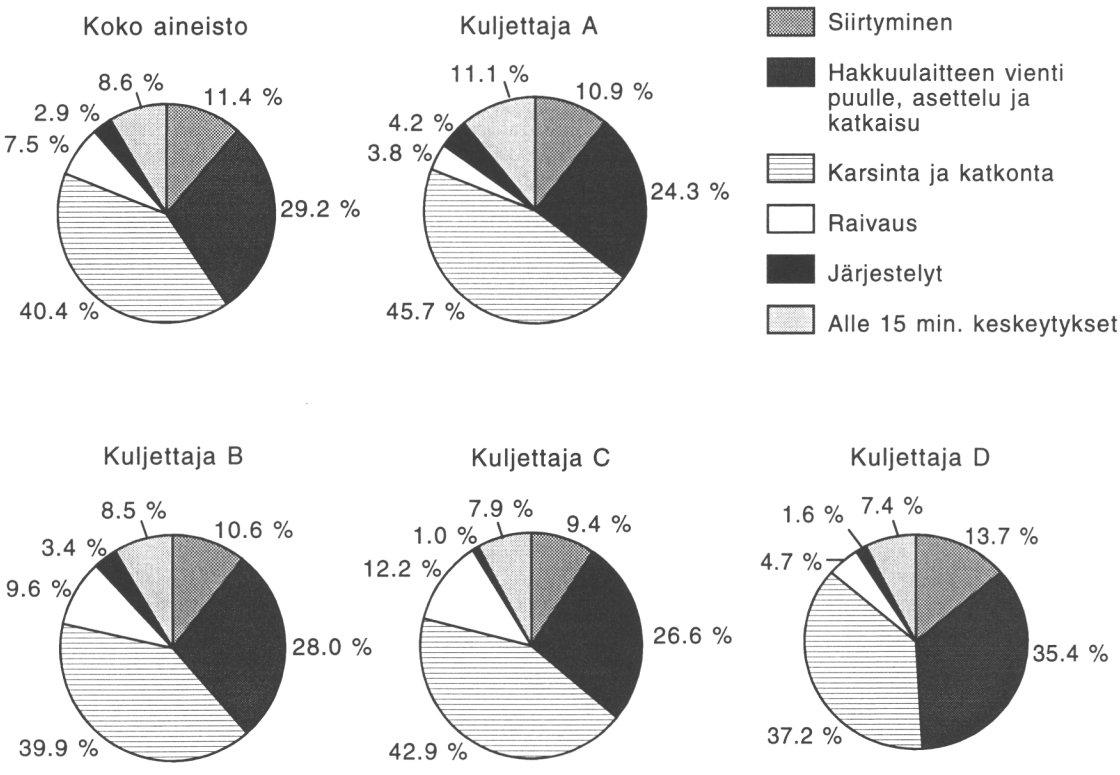
Kokonaisajanmenekin korjattu keskiarvo kuljettajalla A oli 57,96 cmin, kuljettajalla B 103,49 cmin, kuljettajalla C 95,57 cmin ja kuljettajalla D 56,05 cmin. Kuljettajalla A runkokohtainen kokonaisaika oli 1,25-kertainen, kuljettajalla B 1,33-kertainen, kuljettajalla C 1,31-kertainen ja kuljettajalla D 1,26-kertainen tehoaikaan verrattuna. Kuljettaja B:n suuri ero tehoajanmenekin ja kokonaisajanmenekin välillä selittyy osin raivausajan suurella osuudella. Kuljettajilla A ja D tehoaikojen ja kokonaisaikojen suhde on yhdenmukainen, ja se kuvastaa osaltaan kyseisten kuljettajien määrätietoista ja systemaattista työtapaa.

Kovarianssianalyysi puulajin, kuljettajan, käsittelypuolen, ottoetäisyyden, puiden lukumäärän työalueella ja rungon koon vaikutuksesta runkokohtaiseen kokonaisajanmenekkiin sekä ajanmenekin sovitettujen keskiarvojen parittaiset vertailut esitetään taulukkoina liitteessä 4.3 sivulla 178.

Raivauksen osuus käyttöajasta oli koko aineistossa 7,5 %. Kuljettaja A:lla raivauksen osuus oli keskimäärin 3,8 % (vaihtelu leimikoittain 2,1 - 5,1), kuljettaja B:llä 9,5 % (2,5 - 16,7), kuljettaja C:llä 12,2 (9,6 - 13,7) ja kuljettaja D:llä 4,7 (1,0 - 8,5). Osa kuljettajista raivasi vain sen verran aluspuustoa kuin työtilan saamiseksi oli tarpeen, osa teki hakkuun yhteydessä myös systemaattista metsänhoitotyötä. Tutkimuksessa todetut raivausajat olivat melko suuria. Myös sellaiset rungot, jotka kuljettaja on ottanut kuitupuuta tehdäkseen, mutta jotka eivät ole täyttäneet minimimittoja, ovat mukana raivausajoissa. Kuljettajan B korkein raivausajan osuus, 16,7 %, oli leimikolta, jossa oli runsaasti haapaa. Haapa ei kelvannut myyntipuuksi, mutta se oli hakkuuohjeessa käsketty raivata, ja tämä kohotti raivausajan osuuden korkeaksi.

Keskeytysten määristä ja aiheuttajista saadaan luotettava tulos vain pitkäaikaisessa seurannassa, joten tämän tutkimuksen tuloksia voidaan pitää vain suuntaa antavina. Keskeytyksiin luettiin alle 15 minuutin keskeytykset. Tutkimuksesta tai kuljettajan lepotauoista johtuneita keskeytyksiä ei otettu huomioon laskennassa. Koko aineistossa alle 15 min keskeytysten osuus käyttöajasta oli 8,9 % vaihdellen tutkimuskoneittain 7,7 - 9,8 %. Korjausten osuus kaikista keskeytyksistä oli lähes 90 %, työn suunnittelun osuuden ollessa 11 %. Suurin osa korjauksista kohdistui hakkuulaitteeseen.

Koko aineistossa ja kuljettajittain *käyttöajat* jakautuivat kuvan 16 mukaisesti.



Kuva 16. Käyttöajan jakautuminen koko aineistossa ja kuljettajittain.

7.1.3 Liiketyön määrä ja siihen vaikuttavat tekijät

Teholliseen liiketyöhön sisällytettiin hakkuulaitteen liikkeet nosturin tyven suhteen hakkuulaitteen viennissä puulle, karsinnassa ja katkonnassa ja puuta siirrettäessä sekä hakkuulaitteen tuonti koneen lähelle. Tehollisen liiketyön määrää m/valmistettu runko ja m/valmistettu m^3 kuvaavat regressiomallit esitetään taulukoissa 11 ja 12.

Taulukko 11. Tehollisen liiketyön määrää m/valmistettu runko kuvaava regressiomalli. Perustasoina kuljettaja D ja käsittelypuoli 2. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

$$y = a + bx_1 + cx_2 + d_1k_1 + d_2k_2 + d_3k_3 + e_1p_1 + e_2p_2 \quad (11)$$

missä
y = tehollisen liiketyön määrä, m/runko
x_1 = rungon koko, dm^3

x_2 = ottoetäisyys, m
k_1 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuutttuja,=1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
p_1= valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 0, muulloin 0
p_2 = valemuuttuja, =1, jos käsittelypuoli = 1, muulloin 0

a = vakio
b, c,....e_2 = muuttujien kertoimet

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	t-arvo	Pr>ITI
a	9,576	0,1446	66,24	0,0001
b	0,010	0,0003	30,53	0,0001
c	0,546	0,0217	25,13	0,0001
d_1	1,957	0,1213	16,14	0,0001
d_2	1,568	0,1070	14,66	0,0001
d_3	0,718	0,1990	3,61	0,0003
e_1	-4,219	0,1192	-35,41	0,0001
e_2	-4,707	0,1130	-41,67	0,0001
		n = 7708	R^2 = 0,366	RMSE = 3,80

Taulukko 12. Tehollisen liiketyön määrää m/valmistettu m^3 kuvaava regressiomalli. Perustasoina kuljettaja D ja käsittelypuoli 2. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

$$y = (a + d_1k_1 + d_2k_2 + d_3k_3 + e_1p_1 + e_2p_2)x_1^{\,b}x_2^{\,c} \qquad (12)$$

missä
y = tehollisen liiketyön määrä, m/valmistettu m^3
x_1 = rungon koko, dm^3
x_2 = ottoetäisyys, m
k_1 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuutttuja,=1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
p_1= valemuuttuja, = 1, jos käsittelypuoli = 0, muulloin 0
p_2 = valemuuttuja, =1, jos käsittelypuoli = 1, muulloin 0

a = vakio
b, c,....e_2 = muuttujien kertoimet

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	95 % luotettavuusväli alempi	ylempi
a	7154,638	225,3993	6712,788	7596,489
b	-0,938	0,0078	-0,954	-0,923
c	0,237	0,0080	0,221	0,253
d_1	1076,204	73,4017	932,315	1220,094
d_2	1041,010	77,8575	888,386	1193,634
d_3	215,674	143,8734	-66,361	497,709
e_1	-2536,850	103,1766	-2739,107	-2334,593
e_2	-2730,589	99,9877	-2926,594	-2534,583
		n = 7913	RMSE = 57,28	

Kovarianssianalyysi kuljettajan, käsittelypuolen, ottoetäisyyden ja rungon koon vaikutuksesta runkokohtaiseen tehollisen liiketyön määrään m/valmistettu runko sekä liiketyön määrien sovitettujen keskiarvojen parittaiset vertailut esitetään taulukkoina liitteessä 4.4 sivulla 179.

Parittaisissa vertailuissa tehollisen liiketyön määrät valmistettua runkoa kohti poikkesivat kuljettajittain tilastollisesti merkitsevästi toisistaan kaikilla vertailupareilla. Runkokohtaisen liiketyön määrän korjattu keskiarvo kuljettajalla A oli 12,40 m, kuljettajalla B 12,01 m, kuljettajalla C 11,16 m ja kuljettajalla D 10,45 m. Kuljettaja C:n suhteellisen pieni liiketyön määrä/runko selittyy luvussa 7.2.2.3 esitettävällä poistuman rakenteella. Kuljettaja C:n hakkuu keskittyi urapuihin ja uran läheisyyteen, ja tämä vaikutti liiketyön määrään. Kuljettaja D:n muita pienempi liiketyön määrä johtui työtavasta. Kuljettaja D käsitteli viistosti ja kohtisuoraan sivulta otettuja puita muita kuljettajia enemmän ottopuolella uraa, ja tämä vähensi liiketyön määrää.

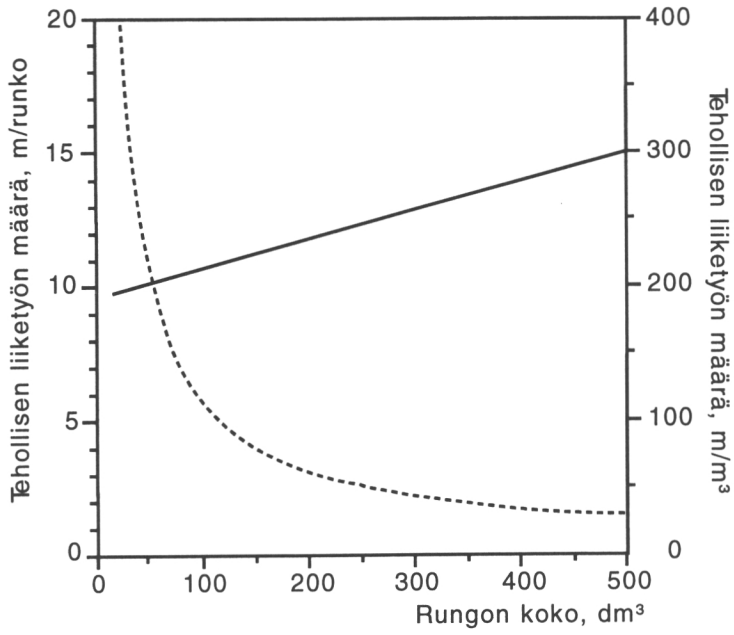
Kaikki käsittelypuolet erosivat toisistaan runkokohtaisen liiketyön määrän suhteen parittaisissa vertailuissa. Liiketyön määrän korjattu keskiarvo oli ottopuolella uraa käsitellyillä puilla 9,78 m, urapuilla 10,26 m ja yli uran viedyillä puilla 14,48 m. Urapuiden ja ottopuolella uraa käsiteltyjen puiden eroa selittää osittain urapuiden suurempi koko.

Rungon koon vaikutusta tehollisen liiketyön määrään koko aineistossa esittää kuva 17. Eri tekijöiden osuudet tehollisen liiketyön kokonaismäärästä olivat taulukon 13 mukaiset.

Kuljettaja D:n tehollisen liiketyön jakautuminen eri työvaiheille poikkesi muiden kuljettajien vastaavista. Kuljettaja D käsitteli usein puun lähellä sen kasvupaikkaa, ja vei muita kuljettajia harvemmin puita uran yli.

Taulukko 13. Eri työvaiheiden osuudet tehollisen liiketyön kokonaismäärästä.

	Hakkuulaitteen vienti puulle	Siirto puun kanssa	Hakkuulaitteen tuonti koneen lähelle
Kuljettaja	Osuus tehollisesta liiketyöstä, %		
A	35,9	46,4	17,7
B	36,1	45,1	18,8
C	34,0	43,6	22,4
D	44,6	34,7	20,7
Koko aineisto	38,7	42,0	19,3



Kuva 17. Tehollisen liiketyön määrä m/runko (_____) ja m/valmistettu m^3 (------) koko aineistossa. Alla kuvaajien yhtälöt.

Liiketyön määrä	*Kuvaajan yhtälö*	
m/runko	$y = 9{,}687 + 0{,}011 * x$	$r^2 = 0{,}095$
m/valmistettu m^3	$y = 5535{,}796 * x^{-0{,}8473}$	*RMSE = 72,88*

7.2 Hakkuukonetyön korjuujälki

7.2.1 Kosketukset ja niistä syntyneet puustovauriot

Vaurioiden syntymekanismin selvittämiseksi seurattiin pystypuihin kohdistuneita kosketuksia ja niistä aiheutuvia vaurioita. Ajourapuihin syntyneitä kosketuksia ei kirjattu. Kuljettajan poistaessa kosketuksen saaneen puun työntukija arvioi, olisiko puu kuulunut metsänhoidollisesti kasvatettaviin vaiko poistettaviin puihin. Mäkelä (1987, s. 4) totesi vauriomäärien olleen jonkin verran pienempiä koneenkuljettajan suorittaessa puuvalinnan. Tämän epäiltiin osittain johtuvan siitä, että koneenkuljettaja poistaa kolhiutuneita puita, jotka ilman vaurioitumista kuuluisivat kasvatettaviin puihin.

Tutkimusaineisto käsitti 8192 runkoa. Työskentelyssä 1579 työsyklissä (19,3 %) tapahtui kosketus pystypuuhun. Työsykli sisältää tässä yhteydessä yhden puun käsittelyn kaikki työvaiheet. Kuljettajakohtaisesti käsitellyt puumäärät, kosketusten määrät ja osuudet esitetään taulukossa 14.

Kosketusten määrä ei suoraan kuvaa työtilanteen vaativuutta tai kuljettajan taitoja. Kuljettaja voi tietoisesti kaataa puun sellaisen puun päälle, jonka hän tietää kohta poistavansa. Kosketuksen saaneet mutta kuljettajan myöhemmin poistamat puut jaoteltiin metsänhoidollisesti poistettaviin ja metsänhoidollisesti kasvatettaviin. Pystyyn jääneistä kosketuspuista tutkittiin mahdolliset vauriot. Kosketuspuiden poistamista ja pystyyn jääneiden kosketuspuiden vaurioitumista esittää taulukko 15.

Kosketuksista 95 % luokiteltiin lieviksi ja 5 % voimakkaiksi. Kosketuksen arvioidun voimakkuuden vaikutusta seurauksiin kuvaa taulukko 16. Työntutkijan arvio kuljettajien poistamien kosketuspuiden jakautumisesta metsänhoidollisiin luokkiin kosketuksen voiman mukaan esitetään taulukossa 17 ja vuodenajan mukaan taulukossa 18 (s. 79). Korjuuajan vaikutus kosketuksen seurauksiin esitetään taulukossa 19 (s. 81).

Taulukko 14. Käsiteltyjen runkojen lukumäärät ja kosketusten määrät tutkimuskuljettajittain ja koko aineistossa.

Kuljettaja	Käsiteltyjä runkoja	Työsyklit, joissa kosketus		Työsyklit, joissa kosketus 2 puuhun	
		kpl	%	kpl	%
A	1664	269	16,2	9	0,5
B	2911	740	25,4	75	2,6
C	465	112	24,1	11	2,4
D	3152	458	14,5	25	0,8
Kaikki	8192	1579	19,3	120	1,5

Taulukko 15. Työn edetessä poistetut kosketuspuut, niiden jakautuminen metsänhoidollisesti poistettaviin ja kasvatettaviin puihin sekä pystyyn jääneisiin kosketuspuihin syntyneiden vaurioiden määrä, osuus ja laatu.

Kuljettaja	Kosketuksia	Metsänhoidollisesti poistetut puut, kpl	Poistetut kasvatettavat puut, kpl	Vaurioituneet jäävät puut		Pintavaurioiden osuus	Syvävaurioiden osuus
	kpl			kpl	%	%	%
A	278	83	6	45	23,8	69	31
B	815	242	39	181	33,9	86	14
C	123	30	9	38	45,2	95	5
D	483	194	19	41	15,2	95	5
Kaikki	1699	549	73	304	28,2	86	14

Taulukko 16. Kosketuksen voiman vaikutus kosketuksen seurauksiin.

Kosketuksen seuraus	Lievä kosketus		Voimakas kosketus	
	kpl	%	kpl	%
Ei vauriota	751	72,5	21	51,2
Pintavaurio	246	23,7	15	36,6
Syvävaurio	37	3,6	4	9,8
Puu poikki	2	0,2	1	2,4
Yhteensä	1036	100,0	41	100,0

Taulukko 17. Työntutkijan arvio kuljettajan työn edetessä poistamien kosketuspuiden kasvatuskelpoisuudesta jaoteltuna kosketuksen voimakkuuden mukaan.

Kosketuksen saaneiden poistettujen puiden kasvatuskelpoisuus	Lievä kosketus		Voimakas kosketus	
	kpl	%	kpl	%
Poistettava	527	91,2	21	48,8
Kasvatettava	51	8,8	22	51,2
Yhteensä	578	100,0	43	100,0

Taulukko 18. Työntutkijan arvio kuljettajan työn edetessä poistamien kosketuspuiden kasvatuskelpoisuudesta eri vuodenaikoina.

Kosketuksen saaneiden poistettujen puiden kasvatuskelpoisuus	Talvi		Kevät-syksy		Kesä	
	kpl	%	kpl	%	kpl	%
Poistettava	220	88,4	151	90,4	177	85,9
Kasvatettava	29	11,6	16	9,6	29	14,1
Yhteensä	249	100,0	167	100,0	206	100,0

Kuljettajat poistivat hieman yli puolet voimakkaan kosketuksen saaneista puista, joista hieman yli puolet arvioitiin kasvatuskelpoisiksi. Lievän kosketuksen saaneista puista kuljettajat poistivat reilun kolmanneksen. Näistä yli 90 % arvioitiin metsänhoidollisesti poistettaviksi. Voimakkaiden kosketusten osuus kosketuksista oli 4,9 %, joten poistettujen kasvatuskelpoisten puiden määrä ei ollut suuri. Kosketuksen voimakkuuden ja puun kasvatuskelpoisuuden määrittäminen ovat kuitenkin arvionvaraisia.

Kesäaikana kuljettajat poistivat jonkin verran enemmän kasvatuskelpoisia kosketuspuita kuin muina vuodenaikoina. Kosketusten arvioitu voimakkuus ei poikennut oleellisesti eri vuodenaikoina, sillä voimakkuudeltaan lieviksi arvioitiin talvella 94,9 %, keväällä ja syksyllä 92,7 % ja kesällä 96,5 % kosketuksista.

Kuljettaja B poisti muita kuljettajia enemmän (61,1 %) voimakkaan kosketuksen saaneista, kasvatettaviksi arvioiduista puista. Syynä lienee kesäaineiston suhteellisen suuri osuus kuljettaja B:llä. Kesällä puu saattaa vaurioituessaan kuoriutua pitkältäkin matkalta. Vaurio on tällöin selvästi kuljettajan havaittavissa, ja hänellä saattaa olla ohje poistaa tällaiset puut.

Työntutkimuksen perusteella laskettiin vaurio-osuudet tutkimusleimikoille vertaamalla seurannassa todettujen vauriopuiden määrää jälki-inventoinnissa mitattuun pinta-alaan ja runkolukuun. Keskimääräinen vaurio-osuus tutkimusleimikoissa oli 3,4 % vaihdellen välillä 0,0 - 8,6 %. Vauriopuiden määrä/ha oli keskimäärin 22,0 vaihdellen 0,0 - 60,9. Keskimääräinen vaurio-osuus kuljettajalla A oli 2,2, kuljettajalla B 4,9, kuljettajalla C 6,6 ja kuljettajalla D 1,4 %.

Vaurioista oli 92,4 % runkovaurioita ja 7,6 % juurenniskavaurioita. Laadultaan runko- ja juurenniskavauriot jakautuivat taulukon 20 mukaisesti. Hakkuukoneen aiheuttamat vauriot olivat valtaosin pienikokoisia pintavaurioita. Vuodenajoittain vaurioiden keskikoot ja pituus-leveys suhteet olivat taulukon 21 mukaiset (pituudella tarkoitetaan vaurion korkeutta rungon pystysuunnassa).

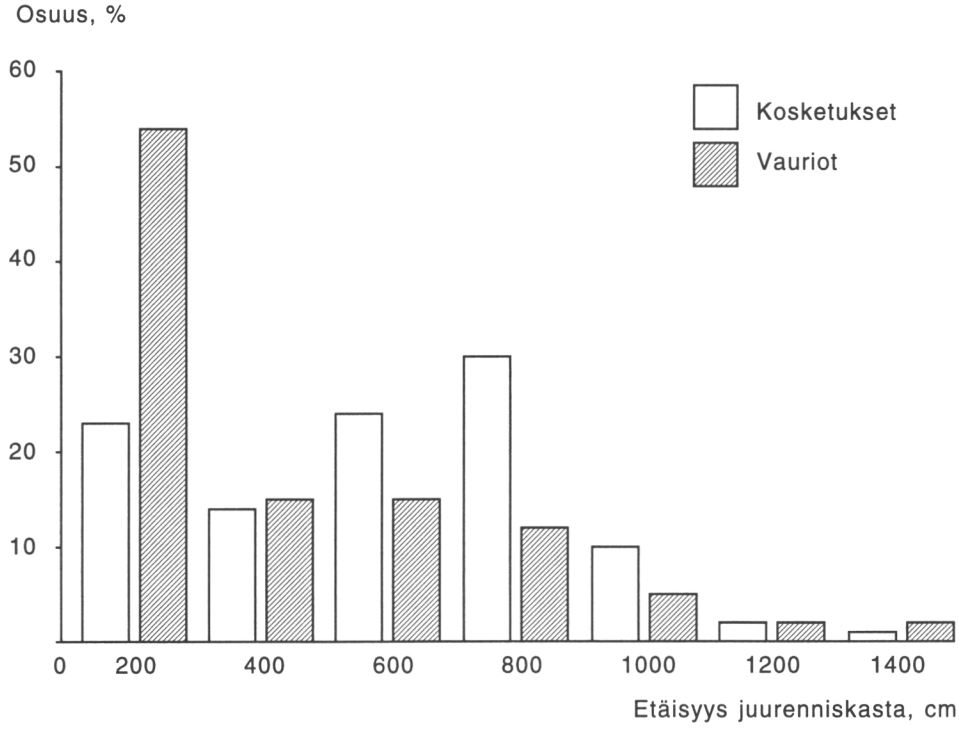
Rungonkohta, johon kosketus ensimmäiseksi kohdistui, kirjattiin etäisyytenä juurenniskasta. Kosketukset kohdistuivat keskimäärin 450 cm:n korkeudelle, ja kosketuspuiden etäisyys hakkuukoneen nosturin tyvestä oli keskimäärin 720 cm. Runkovauriot sijaitsivat keskimäärin 298 cm:n korkeudella juurenniskasta, ja vauriopuiden etäisyys lähimmän uran keskeltä oli keskimäärin 595 cm. Runkovaurioista pintavauriot sijaisivat keskimäärin 306 cm:n ja syvävauriot 165 cm:n korkeudella puussa. Kuvassa 18 esitetään kosketusten ja vaurioiden sijainnin jakaumat eri etäisyyksillä juurenniskasta.

Taulukko 19. Kosketusten seuraukset eri vuodenaikoina.

Kosketuksen seuraus	Talvi kpl	Talvi %	Kevät-syksy kpl	Kevät-syksy %	Kesä kpl	Kesä %
Ei vauriota	417	74,6	188	72,6	170	65,2
Pintavaurio	124	22,2	55	21,2	81	31,0
Syvävaurio	18	3,2	13	5,0	10	3,8
Puu poikki	0	0,0	3	1,2	0	0,0
Yhteensä	559	100,0	259	100,0	261	100,0

Taulukko 20. Vaurioiden jakautuminen laatuluokkiin työntutkimuksessa.

	Runkovauriot	Juurenniskavauriot	Kaikki
Pintavaurioita, %	86,1	78,3	85,8
Syvävaurioita, %	12,9	23,7	13,5
Puu poikki, %	1,0	0,0	0,7
Yhteensä, %	100,0	100,0	100,0



Kuva 18. Kosketusten ja vaurioiden sijainnin jakaumat eri etäisyyksillä juurenniskasta.

Suurin osa kosketuksista ja vaurioista syntyi kaatovaiheessa kaadettavan puun aiheuttaessa kosketuksen. Kookkaita puita kaadettaessa kaatovaurioilta oli vaikea välttyä. Runkoa karsittaessa ja siirreltäessä käsiteltävä runko aiheutti usein kosketuksia. Yleisimmin kosketuksen syyksi luokiteltiin vaikea puun sijainti tai, milloin erityistä syytä ei ollut havaittavissa, muu syy. Suuria puita tiheässä leimikossa kaadettaessa oli kosketuksia usein mahdoton välttää, ja tällöin kirjattiin muu syy. Kuljettajan huolimattomuutta pidettiin kosketuksen syynä, jos kuljettaja olisi työntutkijan arvion mukaan voinut välttää kosketuksen. Kosketusten ja vaurioiden jakautuminen eri työvaiheille, aiheuttajan mukaan ja arvioidun syyn mukaan esitetään taulukoissa 22, 23 ja 24.

Taulukko 21. Vaurioiden pinta-alat (cm^2) ja pituus-leveys suhteet vaurio-tyypeittäin eri vuodenaikoina.

Vuodenaika	Pinta-vauriot	Syvä-vauriot	Kaikki	Pinta-vauriot	Syvä-vauriot	Kaikki
	Pinta-ala, cm^2			Pituus-leveys suhde		
Talvi	35,9	57,1	38,5	5,9	4,2	5,6
Kevät-syksy	39,7	96,3	55,3	8,8	7,6	8,5
Kesä	74,6	92,8	78,3	8,0	5,1	7,7
Kaikki	49,2	80,5	54,3	7,1	5,4	6,8

Taulukko 22. Kosketusten ja vaurioiden jakautuminen eri työvaiheille.

Työvaihe	Osuus kosketuksista, %	Osuus vaurioista, %
Siirto	0,5	1,1
Hakkuulaite puulle, katkaisu	4,1	5,7
Kaato	68,3	64,5
Puun siirto	4,8	5,0
Karsinta ja katkonta	20,6	22,2
Järjestely	0,8	0,4
Raivaus	0,9	1,1
Yhteensä	100,0	100,0

Taulukko 23. Kosketusten ja vaurioiden jakautuminen aiheuttajan mukaan.

Kosketuksen aiheuttaja	Osuus kosketuksista, %	Osuus vaurioista, %
Pyörä	0,4	0,7
Koneen runko	0,0	0,0
Nosturi	2,5	3,6
Hakkuulaite	4,3	5,7
Kaatuva puu	67,7	63,1
Käsiteltävä puu	23,7	25,5
Raivattava puu	1,4	1,4
Yhteensä	100,0	100,0

Taulukko 24. Kosketusten ja vaurioiden jakautuminen arvioidun syyn mukaan.

Arvioitu syy	Osuus kosketuksista, %	Osuus vaurioista, %
Kanto tai kivi	0,4	0,0
Kaltevuus	0,2	0,4
Huono kantavuus	0,0	0,0
Uran kapeus	0,2	0,4
Mutka	0,1	0,0
Puun vaikea sijainti	40,2	35,6
Huolimattomuus	16,7	18,7
Muu syy	42,2	44,9
Yhteensä	100,0	100,0

7.2.2 Jälki-inventoinnin tulokset

7.2.2.1 Jälki-inventoinnin aineisto

Työntutkimusta tehtiin 15 leimikolla kokonaispinta-alaltaan 14,69 ha:n alalla. Jälki-inventoinnissa mitattiin 178 koealalta yhteensä 1398 kpl 10 m x 3 m vyöhykkeitä. Mittausvyöhykkeiden kokonaispinta-ala oli 4,2 ha, joten koko työntutkimusaineistossa otanta oli 28,6 %. Aivan kaikilla koealoilla ei mitattu kahdeksaa vyöhykettä. Koealoja sijaitsi myös leimikon rajoilla olevilla urilla, jolloin uran toinen puoli jäi hakkaamatta. Mitattujen koealojen ja vyöhykkeiden määrät, koealojen osuudet leimikoiden pinta-alasta ja otantaosuuden vaihtelu kuljettajittain on esitetty taulukossa 25.

Aineiston keruun yhteydessä selvitettiin jälkimittauksen ajanmenekkiä mittauskoealaa kohti. Ajanmenekkiin laskettiin mukaan siirtyminen koealalle, koealan rajaus sekä ajoura-, puusto- ja vauriotietojen mittaus. Kahden hengen

Taulukko 25. Työntutkimusleimikoiden jälki-inventoinnin aineisto.

Kuljet-taja	Leimikoiden pinta-ala	Koealoja	Vyöhykkeitä		Otantaosuus, % pinta-alasta	
	ha	kpl	kpl	ha	keskiarvo	vaihteluväli
A	3,68	41	318	0,954	26,2	25,0 - 28,5
B	4,90	64	496	1,488	30,1	23,0 - 35,0
C	0,85	12	96	0,288	34,6	31,7 - 37,5
D	5,26	61	488	1,464	30,8	20,8 - 41,0
Koko aineisto	14,69	178	1398	4,194	30,2	20,8 - 41,0

mittausryhmän keskimääräinen ajanmenekki oli 43 minuuttia koealaa kohti vaihdellen välillä 32 - 60 minuuttia. Kolmen hengen ryhmän keskimääräinen ajanmenekki oli 30 minuuttia/koeala vaihdellen välillä 25 - 40 minuuttia. Kun esimerkiksi hehtaarin koealalle mitattiin 15 koealaa, hehtaarin alueen jälkimittaus vei kolmen hengen ryhmältä aikaa noin 7,5 tuntia.

7.2.2.2 Ajourat ja raiteenmuodostus

Keskimääräinen ajouraväli tutkimusleimikoissa oli 19,8 m keskihajonnan ollessa 3,3 m ja keskiarvon keskivirheen 0,091 m. Leimikoista mitattiin myös lankamittalaitteella uraston kokonaispituus, josta leimikon pinta-alan perusteella laskettiin laskennallinen uraväli. Laskennallinen uraväli koko aineistossa oli 19,9 m. Keskimääräinen ajouraleveys SLU-menetelmällä (liite 2, s. 171) mitattuna oli 4,76 m keskihajonnan ollessa 0,87 m. Kuljettajakohtaiset ajouravälit ja ajouraleveydet olivat taulukon 26 mukaiset.

Taulukko 26. Mitatut ja laskennalliset uravälit sekä uraleveydet kuljettajittain ja koko aineistossa.

Kuljet-taja	Mitattu uraväli, m	Vaihtelu leimikoittain	Lasken-nallinen uraväli, m	Ura-leveys, m	Vaihtelu leimikoittain
A	20,6	20,0 - 22,3	20,8	4,88	4,80 - 5,04
B	18,9	18,2 - 21,9	19,5	4,83	4,47 - 5,09
C	18,9	15,8 - 21,0	21,7	4,86	4,86 - 4,86
D	20,4	19,8 - 21,3	19,2	4,60	4,18 - 4,92
Koko aineisto	19,8	15,8 - 22,3	19,9	4,76	4,18 - 5,09

Leimikot sijaitsivat keskimäärin helpoissa maastoissa. Koealoista yli 80 % sijaitsi karkealla kivennäismaalla, 11 % savimaalla ja 5 % turvemaalla. Kantavuus arvioitiin hyväksi 98 %:lla koealoista. Kaltevuus tutkimus-leimikoilla oli vähäistä, vain hieman yli 10 %:lla koealoista oli merkittävää kaltevuutta. Myös kivisyys oli vähäistä.

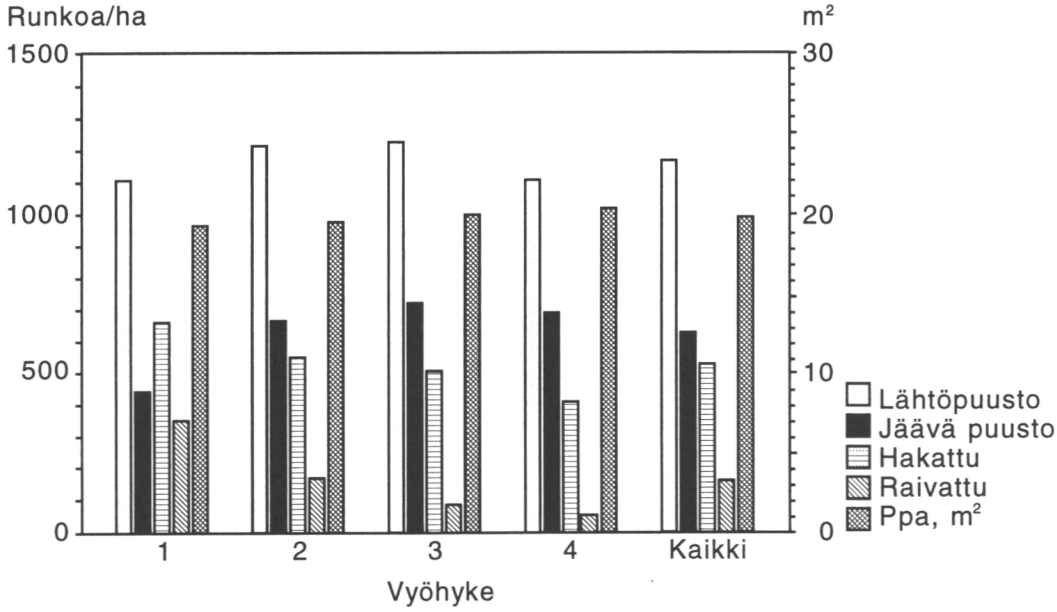
Koko aineistossa suurin koealakohtainen raiteen syvyys oli 7,0 cm. Raiteen syvyys oli yli 3 cm 6,3 %:lla ja yli 5 cm 1,7 %:lla koealoista. Raiteen keskimääräinen syvyys koko aineistossa oli 0,6 cm syvyyden keskihajonnan ollessa 1,48 cm. Leimikoittain raiteiden keskisyvyys vaihteli välillä 0,0 - 2,8 cm. Talvileimikoissa keskimääräinen raiteen syvyys oli 0,1 cm, kevät-syysaikana 1,1 cm ja kesällä 1,3 cm. Hakkuukoneen raiteenmuodostusta voidaan tulosten perusteella pitää vähäisenä. Havutuksen määrän suhteen koealat jakautuivat kuljettajittain seuraavasti:

Kuljettaja	Vähäinen havutus	Runsas havutus
A	57	43
B	44	56
C	73	27
D	54	46
Koko aineisto	52	48

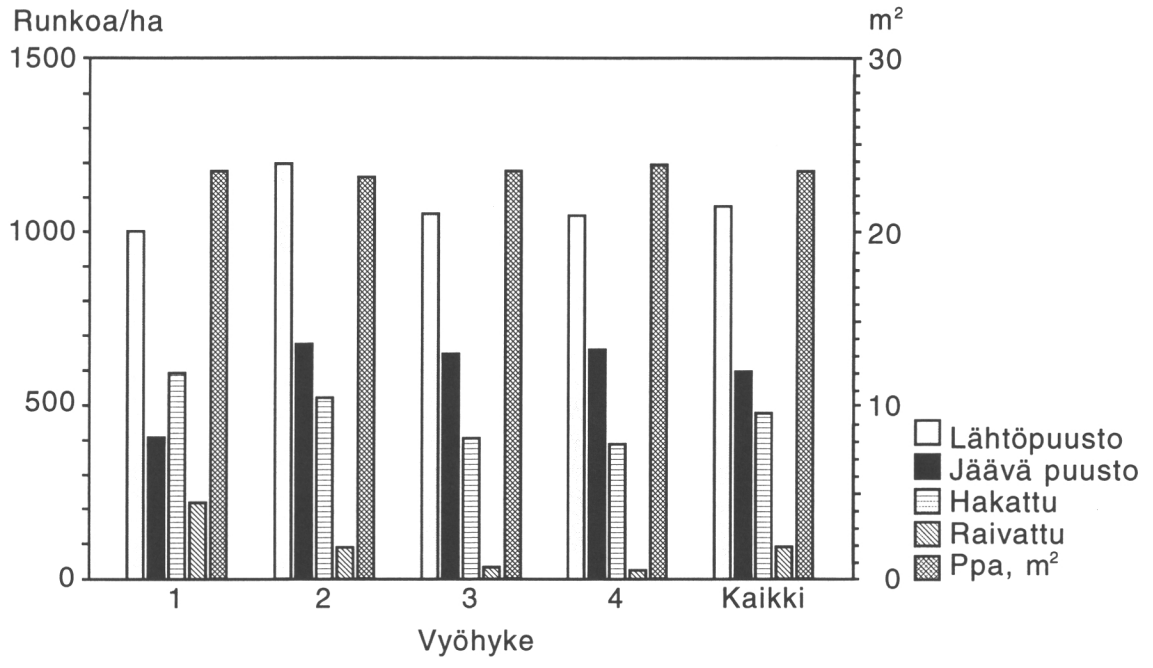
Aiemmin todettiin kuljettaja D:n työtekniikan poikenneen muista kuljettajista siten, että hän toi muita vähemmän uran sivulta otettuja puita uran yli. Tällä ei kuitenkaan ollut oleellista vaikutusta arvioituun havutuksen määrään uralla.

7.2.2.3 Jäävän puuston ja poistuman määrä ja rakenne

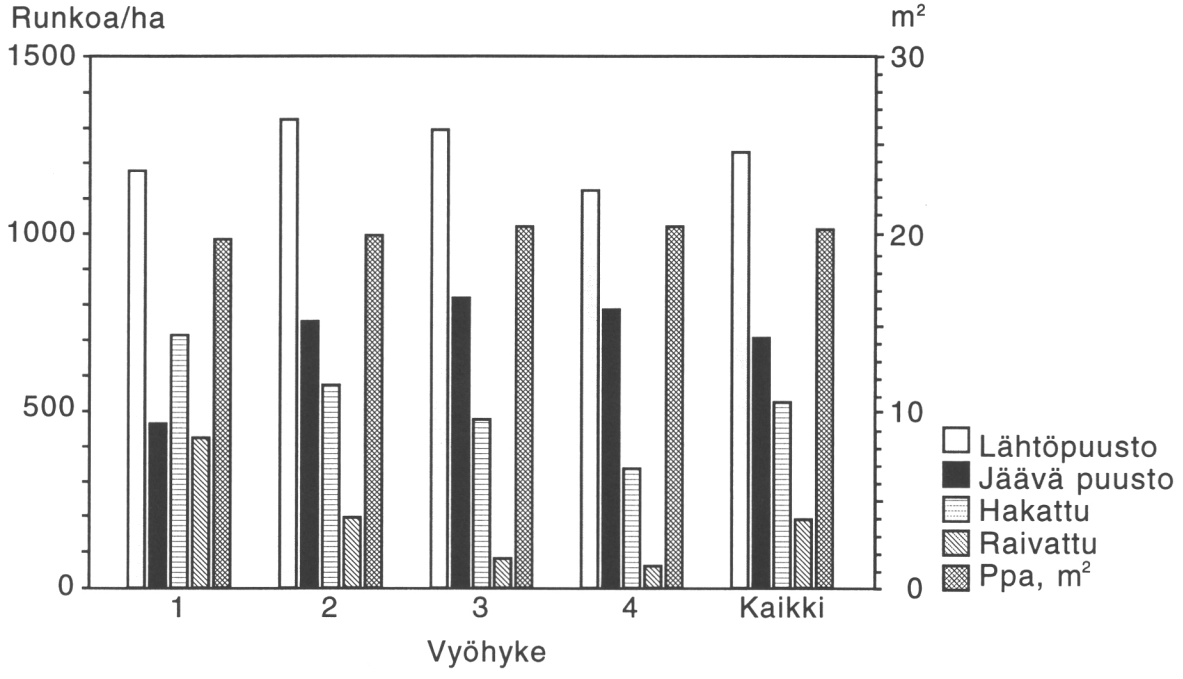
Jälki-inventoinnilla selvitettiin poistuman ja jäävän puuston määrää ja jakautumista sekä korjuuvaurioiden määrää, sijaintia ja laatua. Korjuuvaurioiden osalta kerättiin myös materiaalia tapahtuma-aikaisen tutkimuksen ja jälki-inventoinnin vauriotulosten vertailemiseksi. Samoin selvitettiin pohjapinta-alan tarkkuutta kuvattaessa puuston jakautumista leimikolla. Poistetun ja jäävän puuston kokotietojen perusteella selvitettiin puuvalinnan onnistumista ja ajourien sijoittelua. Puuston määrä ennen hakkuuta, jäävän puuston määrä, hakattujen puiden ja raivattujen puiden määrä sekä pohjapinta-alat vyöhykkeittäin esitetään koko aineistosta ja kuljettajakohtaisesti kuvissa 19 - 23.



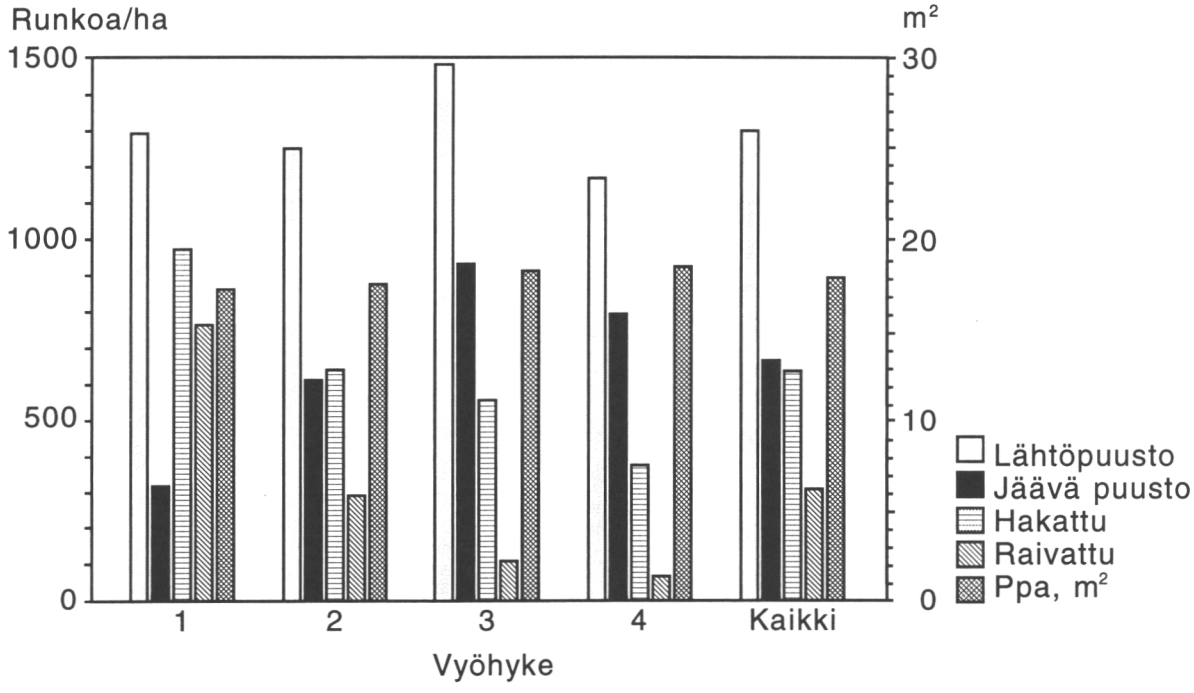
Kuva 19. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala (ppa) eri vyöhykkeillä. Koko aineisto. Vyöhykkeiden etäisyydet uran keskeltä: vyöhyke 1: 0 - 3 m, vyöhyke 2: 3 - 6 m, vyöhyke 3: 6 - 9 m, vyöhyke 4: 9 - 12 m.



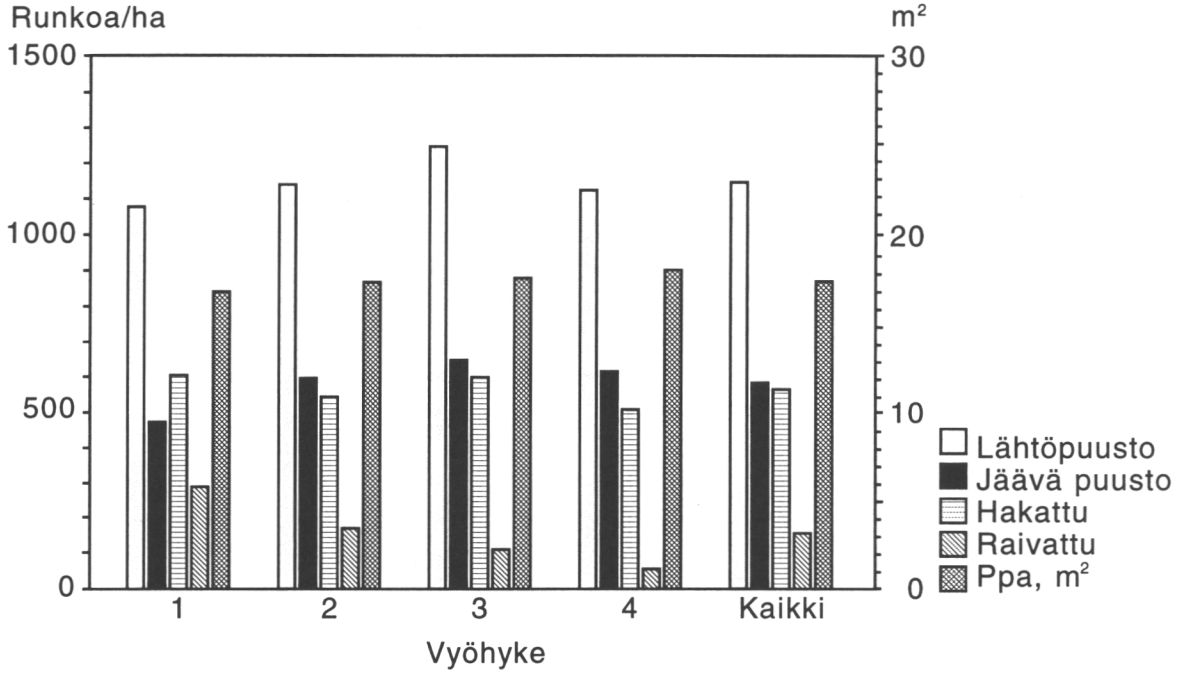
Kuva 20. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen (ppa) eri vyöhykkeillä. Kuljettaja A.



Kuva 21. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen (ppa) eri vyöhykkeillä. Kuljettaja B.



Kuva 22. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen (ppa) eri vyöhykkeillä. Kuljettaja C.



Kuva 23. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen (ppa) eri vyöhykkeillä. Kuljettaja D.

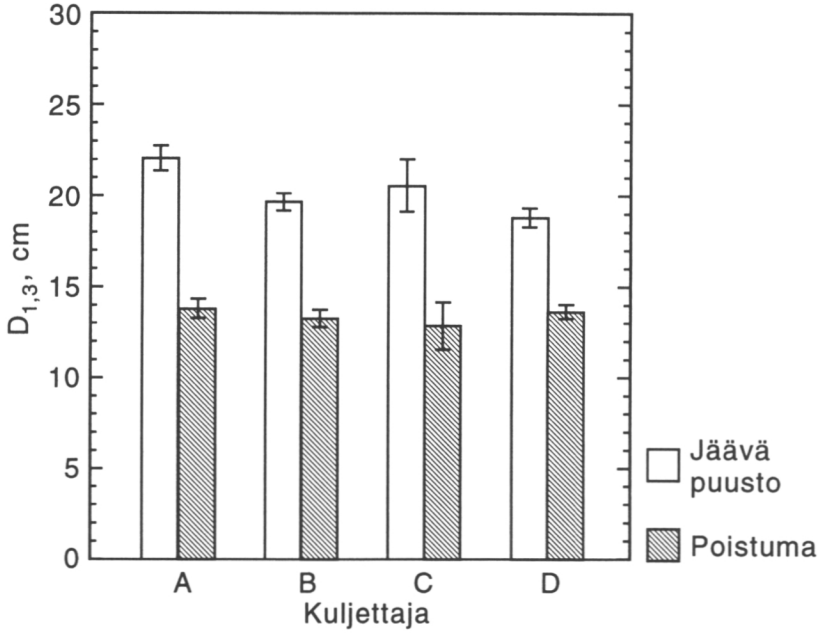
Koko aineistossa harvennus kohdistui suhteellisen tasaisena eri etäisyyksille urista. Vyöhykkeellä 1 lähtöpuusto oli keskimääräistä alhaisempi. Vyöhyke 1 sisältää ajouran, joten urat oli sijoiteltu oikeaoppisesti puustoltaan harvempiin kohtiin. Vyöhykkeellä 1 oli ollut lähtöpuustona keskimäärin 60 puuta vähemmän hehtaarilla kuin leimikolla keskimäärin. Vyöhykkeet 2 ja 3 olivat puolestaan olleet keskimääräistä puustoisempia, kun taas vyöhyke 4 on ollut tiheydeltään samaa luokkaa vyöhykkeen 1 kanssa.

Jäävän puuston määrä oli suhteellisen tasainen. Verrattaessa kahta tiheintä vyöhykettä, vyöhykkeitä 2 ja 3, todetaan vyöhykettä 2 harvennetun hieman voimakkaammin kuin vyöhykettä 3 poistuman ollessa 41,5 % vyöhykkeellä 2 ja 38,5 % vyöhykkeellä 3. Vyöhykkeellä 4 lähtöpuustokin oli pienempi, mutta poistuma oli ainoastaan 32,7 %, minkä ansiosta jäävä puusto oli lähes samaa luokkaa kuin vyöhykkeillä 2 ja 3. Jäävän puuston määrää verrattiin myös Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion harvennusmalleihin (Metsänhoito-suositukset 1989, s. 35a - 35f). Jäävän puuston määrä oli suositusten mukainen kaikissa työntutkimusleimikoissa.

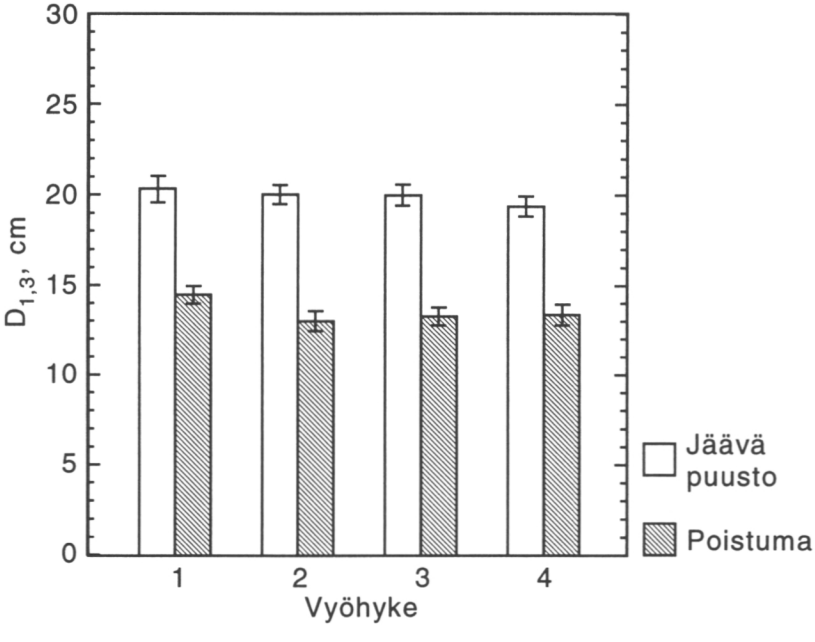
Raivattujen puiden määrä laski selvästi uralta poispäin mentäessä. Raivausta tehdään juuri sen verran kuin työtilan ja näkyvyyden saavuttamiseksi tarvitaan. Kun kokonaan ajouran ulkopuolella olevalta vyöhykkeeltä 2 raivattiin keskimäärin 171 puuta/ha, vyöhykkeeltä 4 raivattiin enää 53 puuta/ha. Raivauspuuston keskimäärää kuvannee vyöhykkeen 1 raivauspuiden määrä, 354 runkoa/ha.

Poistuman määrän ja jakauman suhteen kuljettaja C poikkesi selvästi muista. Kuljettaja C harvensi vyöhykkeitä 1 ja 2 erittäin voimakkaasti. Sen sijaan kuljettajilla A, B ja D jäävän puuston runkoluku vyöhykkeillä 2, 3 ja 4 oli tasainen, vaikka lähtöpuuston määrä vaihteli vyöhykkeittäin. Kuljettajaa D lukuun ottamatta poisto-% pieneni jonkin verran uralta poispäin siirryttäessä. Harvennusvoimakkuutta ja jakaumaa voidaan kuljettajaa C lukuun ottamatta pitää hyvänä. Kuljettaja C harvensi voimakkaasti ajouran reunapuustoa, jonka pitäisi kyetä hyödyntämään ajouralta vapautuva kasvutila. Kuljettaja C:n harvennustulosta onkin pidettävä epätyydyttävänä.

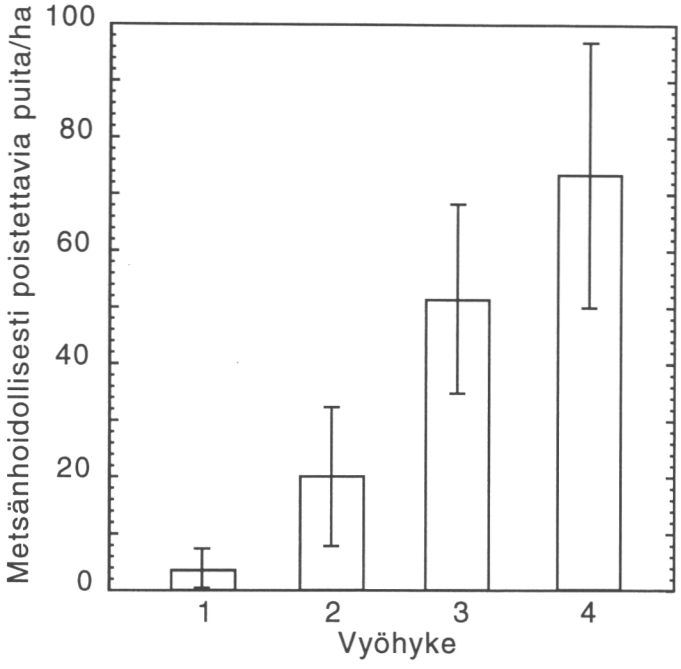
Harvennuksen laatua kuvaa myös poistetun ja jäävän puuston koko, joita selvitettiin mittaamalla jäävän puuston keskimääräistä läpimittaa ja poistettujen puiden keskimääräistä kantoläpimittaa vyöhykkeittäin. Kantoläpimitat muunnettiin leimikoittaisen runkomuodon perusteella rinnankorkeus-läpimitoiksi. Tulosten perusteella työntutkimusleimikoissa tehty harvennus oli selkeästi alaharvennusta kaikilla kuljettajilla. Kuvassa 24 esitetään poistettujen puiden ja jäävien puiden keskiläpimitat eri kuljettajilla. Kuvassa 25 esitetään poistuman ja jäävän puuston läpimitat vyöhykkeittäin koko aineistossa.



Kuva 24. Jäävän puuston ja poistuman keskiläpimitat ja keskiarvon 95 %:n luotettavuusvälit kuljettajittain.



Kuva 25. Jäävän puuston ja poistuman keskiläpimitat ja keskiarvon 95 %:n luotettavuusvälit vyöhykkeittäin. Koko aineisto. Vyöhykkeiden etäisyydet uran keskeltä: vyöhyke 1: 0 - 3 m, vyöhyke 2: 3 - 6 m, vyöhyke 3: 6 - 9 m, vyöhyke 4: 9 - 12 m.



Kuva 26. Metsänhoidollisesti poistettaviksi arvioitujen puiden lukumäärä ja keskiarvon 95 %:n luotettavuusväli vyöhykkeittäin. Vyöhykkeiden etäisyydet uran keskeltä: vyöhyke 1: 0 - 3 m, vyöhyke 2: 3 - 6 m, vyöhyke 3: 6 - 9 m, vyöhyke 4: 9 - 12 m.

Jälki-inventoinnissa mitattiin myös metsänhoidollisesti poistettaviksi katsottavien puiden määrä. Ainoastaan selvästi poistettaviksi katsottavat puut luokiteltiin tähän ryhmään. Seurantaleimikoissa metsänhoidollisesti poistettavia puita oli jäljellä keskimäärin 37 puuta/ha. Kuljettaja A oli jättänyt keskimäärin 20 metsänhoidollisesti poistettavaa puuta hehtaarille, kuljettaja B 61, kuljettaja C 104 ja kuljettaja D vastaavasti 11. Kuljettajien välisiin eroihin vaikuttivat myös erot leimikoiden rakenteessa. Kuvassa 26 esitetään metsänhoidollisesti poistettavien puiden määrä vyöhykkeittäin. Poistettavien puiden määrä kasvoi selvästi uralta poispäin siirryttäessä.

7.2.2.4 Puustovaurioiden määrä, laatu ja sijainti

Jälki-inventoinnissa selvitettiin myös puustovaurioiden määrä, laatu, koko ja sijainti sekä arvioitiin vaurion aiheuttaja ja syy. Näin pyrittiin saamaan tietoa tapahtuma-aikaisen tutkimuksen ja jälki-inventoinnin tulosten vertailtavuudesta. Puustovaurioiden leimikoittaiset määrät ja vaurio-osuudet esitetään taulukossa 27. Vyöhykkeittäiset vaurio-osuudet esitetään taulukossa 28.

Taulukko 27. Puustovaurioiden määrät ja vaurio-osuudet työntutkimus-leimikoissa (suluissa keskiarvon keskivirhe).

Kuljettaja	Vauriopuita, kpl/ha		Vauriopuita, %	
	Keskimäärin	Vaihteluväli	Keskimäärin	Vaihteluväli
A	9,4 (3,1)	6,7 - 15,2	1,8 (0,6)	1,2 - 3,0
B	58,5 (6,4)	26,5 - 96,4	9,1 (1,1)	3,1 -14,0
C	38,2 (10,9)	25,0 - 47,6	7,9 (2,6)	6,1 - 9,4
D	6,2 (2,0)	0,0 - 8,7	1,1 (0,4)	0,0 - 2,3
Koko aineisto	27,7 (2,7)	0,0 - 96,4	4,6 (0,5)	0,0 -14,0

Taulukko 28. Vauriopuiden osuudet jäävän puuston määrästä vyöhykkeittäin Vyöhykkeiden etäisyydet uran keskeltä: vyöhyke 1: 0 - 3 m, vyöhyke 2: 3 - 6 m, vyöhyke 3: 6 - 9 m, vyöhyke 4: 9 - 12 m.

Kuljettaja	Vyöhyke 1	Vyöhyke 2	Vyöhyke 3	Vyöhyke 4	Kaikki
			Vauriopuita, %		
A	0,9	2,2	2,0	0,4	1,8
B	7,9	9,2	9,9	9,2	9,1
C	20,6	1,1	10,9	1,6	7,9
D	1,2	0,4	1,5	1,4	1,1
Koko aineisto	4,8	4,0	5,6	4,1	4,6

Vauriopuiden lukumäärät/ha vyöhykkeittäin olivat seuraavat:

	Vauriopuita, kpl/ha
Vyöhyke 1	19,0
Vyöhyke2	29,6
Vyöhyke 3	31,6
Vyöhyke 4	30,6
Kaikki	27,7

Vauriomäärät poikkesivat kuljettajittain huomattavasti. Kuljettajien A ja D leimikoilla vaurioita oli varsin vähän, kun taas kuljettajilla B ja C vauriomäärät olivat huomattavasti suuremmat. Myös leimikoittainen vaihtelu oli suurta kuljettajilla B ja C. Mielenkiintoinen huomio on myös se, että kuljettajien B ja C tuottavuustaso oli huomattavasti kuljettajien A ja D tasoa alhaisempi. *Tutkimuksen kohteena olleilla kuljettajilla korkea työn tuottavuus ja hyvä korjuujälki kulkivat käsi kädessä.*

Etäisyys ajourasta ei vaikuttanut vauriopuiden osuuteen. Vauriopuiden keskimääräistä pienempi lukumäärä vyöhykkeellä 1 johtuu uran vaikutuksesta, siis pienemmästä runkoluvusta vyöhykkeellä 1. Kuljettajakohtaisesti kuljettajan

C vyöhykkeittäiset vauriomäärät poikkeavat muusta aineistosta, sillä kuljettaja C:llä vauriot keskittyvät vyöhykkeille 1 ja 3.

Jälki-inventoinnissa todetuista vaurioista (n = 115) 91,3 % oli pintavaurioita, 7,8 % syvävaurioita ja 0,9 % katkovaurioita. Vaurioista runkovaurioita oli 79,1 % ja juurenniskavaurioita 20,9 %. Runkovaurioista 92,3 % ja juurenniska-vaurioista 87,5 % oli pintavaurioita. Talvella vaurioiden keskikoko oli 34,0 cm^2, kevät-syyskautena 53,0 cm^2 ja kesällä 48,3 cm^2. Sijainnin ja laadun mukaan vauriot jakautuivat kooltaan seuraavasti:

Vaurion sijainti	Pintavauriot	Syvävauriot	Kaikki
	Pinta-ala, cm^2		
Runko	36,5	92,8	39,9
Juurenniska	60,9	74,0	62,5
Kaikki	40,3	90,8	44,6

Vauriopuiden etäisyys lähimmän uran keskeltä oli keskimäärin 5,34 m. Runkoihin vaurioituneet puut sijaitsivat keskimäärin 5,14 m etäisyydellä uran keskeltä, juurenniskaan vaurioituneilla vastaava etäisyys oli 6,07 m. Runkovaurioiden sijainti korkeutena juurenniskasta oli kaikilla vaurioilla keskimäärin 2,75 m, pintavaurioilla 2,84 m ja syvävaurioilla 1,50 m.

Työntutkija arvioi vaurion syyn ja aiheuttajan. Vauriota tarkastellessaan hän ei tiennyt, mikä oli ollut arvioitu syy tai aiheuttaja tapahtuma-aikaisessa tutkimuksessa. Eri vauriotyypit jakautuivat syyn ja aiheuttajan suhteen taulukoiden 29 ja 30 mukaisesti.

Tarkasteltaessa eri syiden ja aiheuttajien osuutta pinta- ja syvävaurioista todetaan hakkuukoneen rungon, nosturin ja hakkuulaitteen aiheuttaneen keskimääräistä enemmän syvävaurioita.

Taulukko 29. Arvioitu vaurion syy jälki-inventoinnissa.

Vaurion syy	Runkovauriot	Juurenniska-vauriot	Kaikki
Maaston kaltevuus	1,1	0,0	0,9
Ajouran kapeus	2,2	4,2	2,6
Puun vaikea sijainti	24,5	4,2	20,0
Huolimattomuus	24,4	0,0	19,1
Muu syy	47,8	91,6	57,4
Yhteensä	100,0	100,0	100,0

Taulukko 30. Arvioitu vaurion aiheuttaja jälki-inventoinnissa.

Vaurion aiheuttaja	Runkovauriot	Juurenniskavauriot	Kaikki
Pyörä	2,2	4,2	2,6
Koneen runko	1,1	0,0	0,9
Nosturi	7,7	0,0	6,1
Hakkuulaite	22,0	4,2	18,2
Kaatuva puu	40,6	0,0	32,2
Käsiteltävä puu	25,3	91,6	39,1
Raivattava puu	1,1	0,0	0,9
Yhteensä	100,0	100,0	100,0

7.2.3 Työntutkimuksen ja jälki-inventoinnin vauriotulosten vertailu

Sekä työntutkimuksen että jälki-inventoinnin perusteella voidaan arvioida puustovaurioiden määrää, laatua ja sijaintia. Jälki-inventoinnissa koealat käsittivät keskimäärin 30,2 % leimikoiden pinta-alasta otannan ollessa leimikoittain 20,8 - 41,0 %. Otantaan perustuva jälki-inventointi antaa arvion, joka lähestyy todellista vauriomäärää otantaosuuden kasvaessa. Työntutkimuksessakaan ei päästä täysin oikeaan tulokseen, sillä kaikkia kosketuksia on vaikea havaita. Erityisesti puuta käsiteltäessä syntyy lumettomana aikana juurenniskavaurioita, jotka saattavat seurannassa jäädä huomaamatta. Työntutkimuksen vauriomäärät saattavat täten erityisesti kesäleimikoissa olla todellista pienempiä. Taulukossa 31 esitetään vauriopuiden määrät ja osuudet työntutkimuksessa ja jälki-inventoinnissa.

Työntutkimuksessa ja jälki-inventoinnissa todetut vauriomäärät olivat 11 leimikolla lähellä toisiaan. Kuitenkin 4 leimikolla vauriomäärät poikkesivat siten, etteivät työntutkimuksen tulokset mahtuneet jälki-inventoinnin vauriomäärien vaihteluväliin. Erityisen suuret erot olivat leimikoissa B3, B4 ja B5, joissa jälki-inventoinnin antama vaurio-osuus oli enimmillään lähes 3-kertainen työntutkimuksen tuloksiin verrattuna.

Jälki-inventoinnissa mitattiin laatu- ja kokotiedot kaikkiaan 128 vauriosta, työntutkimuksessa samoilta leimikoilta yhteensä 304 vauriosta. Työntutkimuksessa vaurioista oli runkovaurioita 92,4 % ja juurenniskavaurioita 7,6 %, jälki-inventoinnissa vastaavasti 79,7 % ja 20,3 %. Juurenniska-vaurioiden suurempi osuus jälki-inventoinnissa tuli lumettoman ajan leimikoista, joissa työntutkimuksessa oli jäänyt juurenniskavaurioita huomaamatta. Ainoastaan yhdessä leimikossa työntutkimus antoi suuremman arvion juurenniskavaurioiden määrälle kuin jälki-inventointi. Vaurioiden

laadun ja pinta-alojen osalta työntutkimuksen ja jälki-inventoinnin tulokset olivat seuraavat:

Vaurion laatu	Työn-tutkimus	Jälki-inventointi	Työn-tutkimus	Jälki-inventointi
	Osuus, %		Vaurion pinta-ala, cm^2	
Pintavaurio	86	91	49,2	40,3
Syvävaurio	13	8	80,5	90,8
Katkovaurio	1	1	54,3	44,6

Työntutkimuksessa runkovaurioiden keskimääräinen etäisyys juurenniskasta oli kaikilla vaurioilla 2,88 m, pintavaurioilla 3,06 m ja syvävaurioilla 1,65 m. Jälki-inventoinnissa vastaava etäisyys oli kaikilla vaurioilla 2,75 m, pintavaurioilla 2,84 m ja syvävaurioilla 1,50 m.

Taulukko 31. Työntutkimuksen ja jälki-inventoinnin vauriomäärien vertailu sekä otanta-%:t jälki-inventoinnissa (suluissa keskiarvon keskivirhe). Kuljettajat A - D.

Leimikko	Vauriopuita, kpl/ha		Vaurio-osuus, %		Otanta, %
	Työntut-kimus	Inventointi	Työntut-kimus	Inventointi	pinta-alasta
A1	5,0	6,7 (6,67)	1,1	1,2 (1,16)	25,0
A2	20,5	15,2 (7,44)	3,9	3,0 (1,62)	28,5
A3	10,7	7,4 (3,67)	1,6	1,4 (0,75)	25,1
A kaikki	12,1	9,8	2,2	1,9	26,2
B1	35,5	31,3 (12,24)	5,8	4,6 (2,07)	29,7
B2	21,2	26,5 (11,07)	2,0	3,1 (1,45)	35,0
B3	17,8	41,7 (14,86)	2,8	7,9 (3,13)	23,0
B4	60,9	96,4 (15,75)	8,3	14,0 (2,45)	33,4
B5	31,5	62,5 (11,89)	5,8	10,9 (2,17)	29,6
B kaikki	33,4	51,7	4,9	8,1	30,1
C1	50,9	47,6 (15,73)	8,6	9,4 (3,50)	31,7
C2	34.4	25,0 (14,06)	4,5	6,1 (3,80)	37,5
C kaikki	42,7	36,3	6,6	7,8	34,6
D1	8,2	8,4 (5,93)	1,4	0,9 (0,65)	32,9
D2	0,0	0,0 (0)	0,0	0,0 (0,00)	30,0
D3	11,6	6,6 (3,77)	1,8	0,9 (0,52)	29,4
D4	5,4	7,8 (4,48)	1,2	2,3 (1,38)	20,8
D5	16,6	6,0 (5,95)	2,5	1,0 (1,02)	41,0
D kaikki	8,4	5,8	1,4	1,0	30,8
Kaikki	22,0	32,8	3,4	5,7	30,2

Työntutkimuksessa vaurion aiheuttaja ja syy todettiin kosketuksen tapahtumahetkellä. Jälki-inventoinnissa päätelmät aiheuttajasta ja syystä tehtiin lähinnä vaurion sijainnin perusteella. Jälki-inventoinnissa vaurion syyn ja aiheuttajan arvioinut henkilö ei tiennyt, mikä seurannassa oli merkitty syyksi ja aiheuttajaksi. Eri tekijöiden osuudet vaurion aiheuttajana ja syynä seurannassa ja jälki-inventoinnissa esitetään taulukoissa 32 ja 33.

Vaurion aiheuttajaa jälkikäteen arvioitaessa suurin ero työntutkimuksen arvioon oli kaadettavan puun osuudessa. Kaadettavan puun osuus vaurion aiheuttajana arvioitiin jälki-inventoinnissa lähes puolet pienemmäksi kuin työntutkimuksessa. Toisaalta käsiteltävän puun aiheuttamien vaurioiden osuus arvioitiin jälkikäteen todellista suuremmaksi. Raja kaadon ja käsittelyn välillä on kuitenkin liukuva, ja näiden yhteenlaskettu osuus oli seurannassa 88,6 % ja jälki-inventoinnissa 71,3 %.

Taulukko 32. Eri tekijöiden osuudet vaurioiden arvioituna aiheuttajana työntutkimuksessa ja jälki-inventoinnissa.

Vaurion aiheuttaja	Työntutkimus	Jälki-inventointi
	Osuus vaurioista, %	
Pyörä	0,7	2,6
Koneen runko	0,0	0,9
Nosturi	3,6	6,1
Hakkuulaite	5,7	18,2
Kaatuva puu	63,1	32,2
Käsiteltävä puu	25,5	39,1
Raivattava puu	1,4	0,9
Yhteensä	100,0	100,0

Taulukko 33. Eri tekijöiden osuudet vaurioiden arvioituna syynä työntutkimuksessa ja jälki-inventoinnissa.

Vaurion syy	Työntutkimus	Jälki-inventointi
	Osuus vaurioista, %	
Maaston kaltevuus	0,4	0,9
Huono kantavuus	0,0	0,0
Uran kapeus	0,4	2,6
Puun vaikea sijainti	35,6	20,0
Huolimattomuus	18,7	19,1
Muu syy	44,9	57,4
Yhteensä	100,0	100,0

Vaurion syyn arviointi on vaikeaa sekä itse kosketuksen tapahtumahetkellä että erityisesti jälkikäteen. Tätä kuvaa vaihtoehdon "muu syy" suuri osuus, 57,4 % jälki-inventoinnissa ja 44,9 % työntutkimuksessa. Vaurioitumiselle on kuitenkin usein vaikea löytää mitään syytä. Vaikka kaato pystytään hakkuukoneella tekemään hallitusti, etenkin kookkaampia puita tiheässä metsässä käsiteltäessä vaurioilta on vaikea välttyä. Huolimattomuus, jonka osuus molemmissa arvioissa on hieman alle viidennes vaurioista, merkittiin syyksi, jos kuljettaja olisi voinut välttää vaurion toimimalla toisin. Huolimattomuus luettiin syyksi esimerkiksi karsittavan puun tai hakkuulaitteen osuessa pystypuuhun.

7.2.4 Vertailuleimikoiden korjuujälki

Työntutkimusleimikoiden lisäksi inventoitiin 9 leimikkoa, kokonaispinta-alaltaan 5,86 ha. Leimikoista 5 oli työntutkimuskuljettajien leimikoita (kuljettajalla A 2 leimikkoa, kuljettajilla B, C ja D 1 leimikko), ja 4 leimikkoa kahden sellaisen kuljettajan hakkaamia, joilta ei kerätty työntutkimusaineistoa. Vertailuleimikot olivat kuusivaltaisia kuusen osuuden jäävästä puustosta ollessa 85 %. Leimikoiden lähtöpuusto oli keskimäärin 1136 runkoa/ha ja jäävä puusto 614 runkoa/ha. Vertailuleimikoiden tiedot on esitetty liitteessä 3 sivulla 175.

Vertailuaineistolla haluttiin selvittää tulosten yleistettävyyttä. Niukkojen rahoitusresurssien vuoksi aineiston määrässä jouduttiin tinkimään. Vertailuleimikoiden tulokset esitetään kahdessa ryhmässä, työntutkimus-kuljettajien 5 leimikkoa yhtenä ryhmänä ja kahden muun kuljettajan 4 leimikkoa toisena ryhmänä.

Vertailuaineiston pinta-ala, mitattujen vyöhykkeiden määrä ja otantaosuus leimikoiden pinta-alasta esitetään taulukossa 34, ajouravälit ja ajouraleveydet taulukossa 35.

Taulukko 34. Vertailuaineiston määrä kuljettajaryhmittäin.

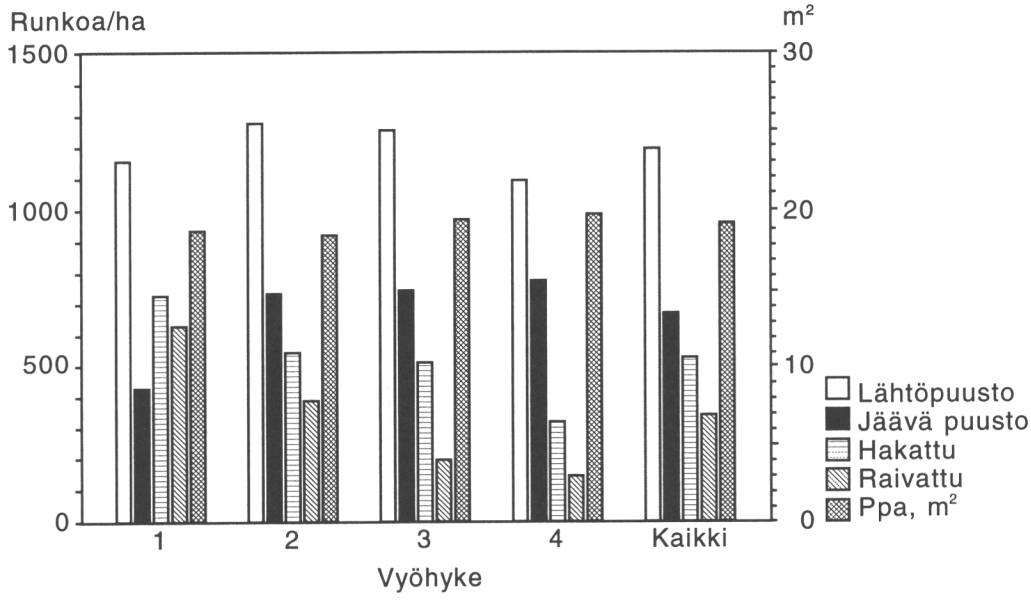
	Leimikoiden pinta-ala, ha	Vyöhykkeitä kpl	Otantaosuus, % pinta-alasta
Työntutkimuskuljettajat	3,65	349	28,7
Muut kuljettajat	2,21	264	35,8
Kaikki	5,86	613	31,4

Taulukko 35. Ajouravälit ja ajouraleveydet kuljettajaryhmittäin vertailuleimikoissa.

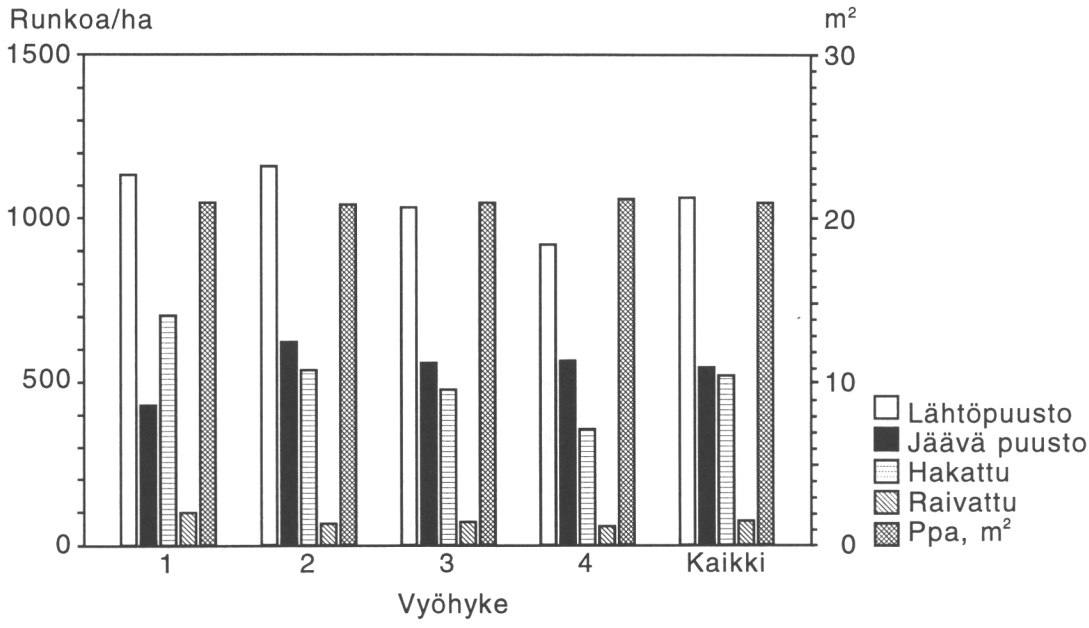
	Ajouraväli, m			Ajouraleveys, m		
	Keski-arvo	Keskiarvon keskivirhe	Keski-hajonta	Keski-arvo	Keski-arvon keskivirhe	Keski-hajonta
Työntutkimus-kuljettajat	21,4	0,20	3,7	4,82	0,049	0,91
Muut kuljettajat	19,1	0,28	4,5	4,97	0,058	0,94
Kaikki	20,5	0,17	4,2	4,88	0,038	0,93

Kaikki vertailuaineiston leimikot korjattiin talvella roudan ollessa maassa. Hakkuukoneen aiheuttamat maaperävauriot olivat varsin vähäiset. Keskimääräinen raiteen syvyys oli 0,1 cm suurimman koealoittaisen raiteen syvyyden ollessa 4 cm.

Puuston määrä ennen hakkuuta, jäävän puuston määrä, hakattujen puiden määrä ja raivattujen puiden määrä vyöhykkeittäin työntutkimuskuljettajien leimikoissa esitetään kuvassa 27 ja muiden kuljettajien leimikoissa kuvassa 28.



Kuva 27. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu puusto ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen (ppa) eri vyöhykkeillä. Työntutkimuskuljettajien vertailuleimikot. Vyöhykkeiden etäisyydet uran keskeltä: vyöhyke 1: 0 - 3 m, vyöhyke 2: 3 - 6 m, vyöhyke 3: 6 - 9 m, vyöhyke 4: 9 - 12 m.



Kuva 28. Lähtöpuusto, jäävä, hakattu puusto ja raivattu puusto sekä pohjapinta-ala harvennuksen jälkeen (ppa) eri vyöhykkeillä. Muiden kuljettajien vertailuleimikot.

Työntutkimuskuljettajilla harvennusvoimakkuus ja poistuman jakauma olivat varsin samansuuntaiset sekä työntutkimus- että vertailuleimikoilla. Jäävän puuston määrä oli tasainen eri etäisyyksillä urasta. Muiden kuljettajien leimikoissa lähtöpuusto oli jakautunut epätasaisesti, ja se on vaikuttanut myös jäävän puuston epätasaiseen jakautumiseen.

Kaikissa työntutkimuskuljettajien vertailuleimikoissa kasvamaan jätetty puusto vastasi Metsätalouden kehittämiskeskus Tapion suosituksia ((Metsänhoito-suositukset 1989, s. 35a - 35f). Yhdessä muiden kuljettajien vertailuleimikoista jäävän puuston määrä oli alle harvennusmallien alarajan.

Puustovaurioiden määrä vertailuaineistossa esitetään taulukossa 36. Työntutkimuskuljettajilla vauriomäärät olivat samaa tasoa vertailu- ja työntutkimusleimikoissa. Kahdella muulla kuljettajalla puustovaurioiden määrät olivat keskimäärin suuremmat kuin työntutkimuskuljettajilla. Tutkimusaineiston korkein vaurio-%, 18,3, oli kuljettajalla, jolta inventoitiin vain 1 leimikko. Myöskään jäävän puuston määrä ja jakautuminen eivät tämän kuljettajan leimikolla olleet hyväksyttävällä tasolla.

Taulukko 36. Vauriopuiden määrät ja vaurioprosentit vertailuaineistossa.

	Keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Keski-hajonta	Vaihteluväli
		Vauriopuita/ha		
Työntutkimus-kuljettajat	26,8	5,1	94,2	4,4 - 50,0
Muut kuljettajat	57,3	9,3	150,6	24,7 - 109,4
Koko vertailuaineisto	39,9	5,0	122,5	4,4 - 109,4
		Vauriopuita, %		
Työntutkimus-kuljettajat	4,1	0,9	15,2	0,7 - 8,7
Muut kuljettajat	10,0	1,7	25,1	3,0 - 18,3
Koko vertailuaineisto	6,6	0,9	20,2	0,7 - 18,3

Vertailuaineiston vaurioista (n = 72) 72,2 % oli pintavaurioita, 26,4 % syvävaurioita ja 1,4 % katkovaurioita. Vertailuaineistossa syvävaurioiden osuus oli hieman suurempi kuin työntutkimusaineistossa. Vaurioista 98,5 % kohdistui runkoon ja 1,5 % juurenniskaan. Juurenniskavaurioiden vähäinen osuus johtunee siitä, että kaikki vertailuleimikot korjattiin talvella. Kaikkien vaurioiden keskimääräinen koko oli 25,8 cm^2, pintavaurioiden 18,4 cm^2 ja syvävaurioiden 47,4 cm^2.

Runkovaurioiden keskimääräinen etäisyys juurenniskasta oli 1,36 m ja vauriopuiden keskimääräinen etäisyys lähimmän uran keskeltä oli 4,66 m. Kaatuva tai käsiteltävä puu arvioitiin vaurion aiheuttajaksi lähes 60 %:ssa vaurioista ja hakkuulaite lähes 40 %:ssa vaurioista Puun vaikea sijainti, huolimattomuus ja muu syy arvioitiin yleisimmin vaurioitumisen syiksi.

Työntutkimuskuljettajien tulokset vertailuleimikoissa olivat samansuuntaisia kuin työntutkimusleimikoissa. Kahden muun kuljettajan aineistot jäivät valitettavan pieniksi, minkä vuoksi johtopäätösten teko on vaikeaa. Tulokset vahvistavat kuitenkin jo työntutkimusaineistossa todettua korjuujäljen suurta vaihtelua kuljettajien välillä.

7.2.5 Tutkimuksessa todetun korjuujälkitason seurausvaikutukset

Korjuujälkeä mitattaessa ja hyväksyttävästä korjuujäljen tasosta sovittaessa on kiinnitetty verraten vähän huomiota korjuujäljen seurausvaikutuksiin. Keskusteluissa on painotettu esimerkiksi puustovaurioiden määrää erittelemättä

tarkemmin vaurioiden laatua. Kuitenkin vaurioiden laatu, koko ja vauriopuun laji vaikuttavat ratkaisevasti vaurioitumisen seurauksiin. Jos seurauksia halutaan arvioida, metsässä tehtävien mittausten on nivellyttävä seurausvaikutusten arviointiin.

Huono korjuujälki aiheuttaa kasvutappioita, laatutappioita ja sekundäärituhoja. Kasvutappioita aiheuttavat ajourat, ajourapainumat ja puustovauriot, laatutappioita puolestaan puustovauriot lahoutumisen tai koroutumisen seurauksena. Korjuujäljen sekundäärituhoilla ymmärretään hyönteis-, tuuli- ja lumituhoja. Tuhohyönteiset iskeytyvät vaurioiden heikentämiin puihin, juurivauriot puolestaan altistavat puut myrskytuhoille. Sekundäärivaikutuksiin kuuluu myös kesäaikaisen harvennuksen maannousemariski. Alttius tuuli- ja lumituhoille lisääntyy harvennusvoimakkuuden kasvaessa. Sekundäärituhot, erityisesti hyönteistuhot, voivat aiheuttaa huomattavia menetyksiä metsänomistajalle. Tuhojen ennustaminen ja arviointi on hankalaa, koska ne ovat yleensä leimikkokohtaisia ja riippuvat säätilasta ja muista ulkoisista tekijöistä.

Tutkimuksessa todetun korjuujäljen seurausvaikutuksia tarkasteltiin Kokon ja Sirénin (1996, s. 45 - 56) esittämällä laskentaohjelmalla. Laskentaohjelma ottaa huomioon puustovaurioiden aiheuttamat kasvu- ja laatutappiot sekä ajouraaukon ja urapainumien aiheuttamat menetykset. Harvennusvoimakkuuden vaikutuksia ohjelmalla ei voida ennustaa.

Esimerkkilaskelmassa etelä-suomalainen MT-kuusikko harvennettiin kiertoaikana kahdesti MELA-mallien (Hynynen 1996) mukaan. Seurauskustannusten laskentaohjelmalle annetut puustotunnukset metsikön eri kehitysvaiheissa olivat seuraavat:

Lähtöpuusto 2000 runkoa/ha.

- *1. harvennus: ikä 40 vuotta, jäävä puusto 982 runkoa/ha, poistettavien runkojen keskikoko 74,6 dm^3, kasvu harvennuksen jälkeen 8,22 m^3/a.*
- *2. harvennus: ikä 60 vuotta, jäävä puusto 581 runkoa/ha, poistettavien runkojen keskikoko 226,6 dm^3, kasvu harvennuksen jälkeen 7,31 m^3/a.*
- *Päätehakkuu: ikä 90 vuotta, kertymä 579 runkoa/ha, rungon keskikoko 658,7 dm^3.*
- *Tukkiosan päättymiskorkeus (Laasasenaho 1982) 2. harvennuksessa on 7,0 m ja tukkiosuus 45,8 %, päätehakkuussa vastaavasti 14,7 m ja 81,9 %.*

Esimerkkilaskelmassa laskettiin korjuujäljen seurausvaikutukset tutkimuksessa todetun hakkuuvaiheen keskimääräisen korjuujäljen mukaisesti. Vauriopuiden osuudeksi annettiin 4,6 %, josta runkovaurioita oli 79,1 % ja juurenniska-

vaurioita 20,9 %. Runkovaurioista oli pintavaurioita 92,3 %, juurenniskavaurioista vastaavasti 87,5 %. Pintavauriot sijaitsivat keskimäärin 306 cm:n ja syvävauriot 165 cm:n korkeudella rungossa. Vaurioiden kokojakaumana käytettiin tutkimuksessa todettua jakaumaa, ajouraväliksi annettiin 19,8 m, uraleveydeksi 4,8 m ja keskimääräiseksi raiteen syvyydeksi 1,0 cm.

Kuusitukille annettiin hinnaksi 220 mk/m^3, kuusikuitupuulle 130 mk/m^3 ja mäntykuitupuulle 100 mk/m^3 (lahoutuneesta kuusesta oletettiin saatavan mäntykuitupuun hinta). Ensimmäisessä harvennuksessa vaurioituneita puita pyritään yleensä poistamaan muuta puustoa enemmän ennen päätehakkuuta. Tämä otetaan huomioon tappioiden realisoitumisessa olettamalla laskentamallissa, että toisessa harvennuksessa realisoituva osa vastaa runkoluvun mukaista harvennuspoistumaa kerrottuna ajouran reunapuuston suhteellisella tiheydellä, joka on yleensä 1,0 - 1,4. Esimerkkilaskelmassa käytettiin reunapuuston tiheytenä 1. harvennuksessa arvoa 1,3 ja 2. harvennuksessa arvoa 1,1. Reunapuuston ollessa tiheämpää kuin ajourien välissä oleva puusto voidaan vauriopuita poistaa vastaavassa suhteessa terveitä puita enemmän.

Menetysten markkamääräiseen lopputulokseen vaikuttaa kustannusten siirtäminen realisoitumisajankohdasta nykyhetkeen eli diskonttaus. Korkoprosentista ja aikavälistä tappioiden syntymisestä niiden realisoitumiseen riippuen, menetysten arvo pienenee nykyhetkeen siirrettynä seuraavasti:

$$pv = x * [\ 1/((100+p)/100)^n\ ] \qquad \textbf{(13)}$$

missä
pv = tappioiden arvo nykyhetkeen siirrettynä
x = tappio realisoitumishetkellä
p = käytetty korkoprosentti
n = aikaväli, a

Esimerkkilaskelmaan lisättiin metsäkuljetuksen vauriot. Metsäkuljetuksessa vauriopuiden osuudeksi arvioitiin 1 %, mikä vastaa Sirénin (1981, s. 6) ja Lillebergin (1984, s. 7) toteamaa tasoa. Metsäkuljetuksen vaurioista arvioitiin kohdistuvan 70 % runkoon ja 30 % juurenniskaan. Runkovaurioista oletettiin pintavaurioiksi 60 %, juurenniskavaurioista vastaavasti 40 %. Runkovaurioiden keskimääräiseksi sijaintikorkeudeksi annettiin 100 cm. Metsäkuljetuksessa oletettiin myös syntyvän painumia siten, että hakkuun ja metsäkuljetuksen jälkeen keskimääräinen painuman syvyys on 5,0 cm.

Edellä esitetyllä korjuujäljellä Kokon ja Sirénin (1996) esittämä laskentamalli antoi taulukossa 37 esitetyt seurausvaikutukset. Nykyarvot laskettiin 3 % :n korolla. Korjuussa käytettiin samaa ajouraverkkoa sekä 1. että 2. harvennuksessa, joten ajourien (ajoura-aukon) kustannukset kohdistettiin 1. harvennukselle. Ajourien kustannuksia ei jaoteltu erikseen hakkuuvaiheelle ja

metsäkuljetukselle, vaan ne ilmoitetaan yhteisenä molemmille työvaiheille. Sen sijaan raiteenmuodostuksen ja puustovaurioiden seuraukset otettiin huomioon erikseen hakkuuvaiheelle ja metsäkuljetukselle.

Kiertoajan kokonaistappioiden nykyarvoksi saatiin 1157,89 mk/ha. Tätä voitaneen pitää siedettävänä suhteessa harvennuksesta saataviin hyötyihin. Tappioiden jakautumista tarkasteltaessa huomio kiinnittyy ajourien (ajoura-aukon) yli 60 % osuuteen kokonaistappioista. Kun ajoura-aukon aiheuttamiin menetyksiin lisätään urapainumien vaikutukset, kattavat ajourat noin 70 % kokonaistappioista. Menetysten loppuosa koostuu puustovaurioiden aiheuttamista kasvu- ja laatutappioista. Lahoutuminen aiheuttaa neljänneksen kokonaistappioista kasvutappioiden osuuden ollessa noin 5 % kokonaistappioista.

Taulukko 37. Korjuuvaurioiden seurausvaikutukset (m^3/ha ja mk/ha) tutkimuksessa todetun keskimääräisen korjuujäljen mukaisesti. Metsäkuljetuksessa vauriopuiden osuudeksi on annettu 1 %. Seurauskustannusten nykyarvot on laskettu 3 %:n korolla.

	Hakkuu	Metsä-kuljetus	Yhteensä	Hakkuu	Metsä-kuljetus	Yhteensä
	Tappiot m^3/ha			Tappioiden nykyarvo, mk/ha		
1. harvennuksen kasvu- ja laatutappiot						
Kasvutappiot						
Ajourat			10,80			711,58
Urapainumat	0,14	0,41	0,55	9,04	27,12	36,16
Puustovauriot	0,28	0,10	0,38	20,21	7,18	27,39
Laatutappiot						
Lahoutuminen	1,88	0,88	2,76	63,91	31,00	94,91
Yhteensä			14,49			870,04
2. harvennuksen kasvu- ja laatutappiot						
Kasvutappiot						
Ajourat			0,00			0,00
Urapainumat	0,20	0,59	0,79	16,57	49,71	66,28
Puustovauriot	0,23	0,11	0,34	19,34	9,34	28,68
Laatutappiot						
Lahoutuminen	1,55	0,90	2,45	72,93	119,96	192,89
Yhteensä			3,58			287,85
Kiertoajan kokonaistappiot						
Kasvutappiot						
Ajourat			10,80			711,58
Urapainumat	0,34	1,00	1,34	25,61	76,83	102,44
Puustovauriot	0,51	0,21	0,72	39,55	16,52	56,07
Laatutappiot						
Lahoutuminen	3,43	1,78	5,21	136,84	150,96	287,80
Yhteensä		18,07				1157,89

Taulukko 38. Uravälin vaikutus tappioiden nykyarvoon.

Tappioiden aiheuttaja	Uraväli		
	19,8 m	25,0 m	30,0 m
	Tappioiden nykyarvo, mk/ha		
Ajourat	711,58	563,57	469,64
Urapainumat	102,44	76,03	60,93
Yhteensä	814,02	639,60	530,57

Ajourien suurta vaikutusta esimerkkilaskelmassa korostavat lyhyt ajouraväli ja leveät ajourat. Jos ajouraleveys ja raiteenmuodostus pidetään laskelmassa entisellään, mutta uraväliksi annetaankin vaihtoehtoisesti 25 m ja 30 m, laskentaohjelma antaa ajourien aiheuttamiksi menetyksiksi kiertoaikana taulukon 38 mukaiset markkamääräiset nykyarvot.

Jos uraleveydeksi annetaan 4,8 m:n sijasta 4,0 m ja pidetään uravälinä 19,8 m, ajourien kustannuksiksi saadaan 438,82 mk ja raiteiden kustannuksiksi 233,08 mk. Raiteenmuodostuksen kustannus kasvaa siksi, että urien ollessa kapeampia urapainumat ovat lähempänä uran reunapuita, jolloin keskimäärin suurempi osuus reunapuiden juuristosta altistuu raiteille. Kun uraleveydeksi annetaan 4,0 m ja uraväli kasvatetaan 30 m:n, laskentaohjelma antaa ajourien kustannuksiksi 289,62 mk ja raiteille vastaavasti 197,39 mk.

Korkokanta vaikuttaa oleellisesti menetysten nykyarvoon. Hakkuuvaiheen seurauskustannuksiksi lisättynä ajoura-aukkojen kustannuksilla saadaan 3 %:n korolla 913,58 mk ja vastaavasti 1 %:n korolla 1794,44 mk. Metsänkorkoperiaatteen mukaan korkoprosenttina voisi olla jopa 0 (Hämäläinen 1973, s. 43). Metsänkorkoperiaatteen mukaan voidaan ajatella, että Suomen, jonkin yrityksen tai metsäalueen metsiä harvennetaan tästä eteenpäin jatkuvana prosessina, jolloin nyt tehtävä harvennus ja korjuujäljen seuraukset realisoituvat samalla hetkellä suuren metsäalueen toisessa osassa. Ainakaan kovin korkean koron käyttö seurausvaikutusten laskennassa ei ole perusteltua.

7.3 Puustovaurioiden määrän ennustaminen

7.3.1 Mallin rakenne

Puustovaurioiden määrän ennustamiseksi on tunnettava työvaiheet eri työoloissa, kussakin työvaiheessa pystypuihin syntyvien kosketusten määrä ja kosketusten määrään vaikuttavat tekijät. Toisaalta on tunnettava eri työvaiheiden ja kone-elinten aiheuttamien kosketusten seuraukset ja vaurion syntyherkkyyteen vaikuttavien tekijöiden, kuten vuodenajan, vaikutus.

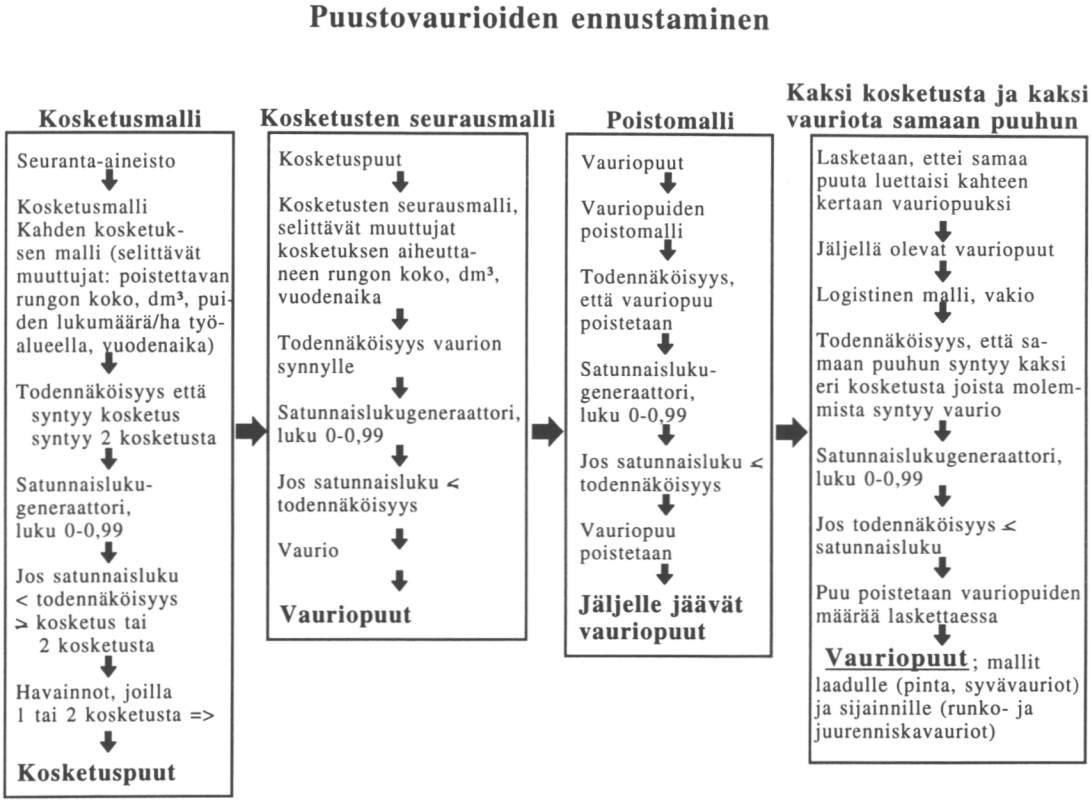
Puustovaurioiden ennustemalli koostuu kahdesta pääosasta, *kosketusmallista* ja *kosketusten seurausmallista*. Kosketusmallilla kuvataan kosketusten määrää eri työvaiheissa ja koko työsyklillä erilaisissa työoloissa. Varsinkin tiheässä puustossa työskenneltäessä saattaa samaa puuta käsiteltäessä syntyä kosketus kahteen eri puuhun. Tällaisten tapausten ennustamiseksi on laadittu kahden kosketuksen malli. Mallit on laskettu sekä kutakin kuljettajaa että koko aineistoa koskien. Kosketusten seurausmalli kuvaa kosketusten seurauksia. Mallin aineistona ovat kaikki sellaiset kosketuspuut, joita kuljettajat eivät ole poistaneet. Kosketusten seurausmallit on myös laskettu eri työvaiheille ja koko työsyklille.

Yhdistämällä kosketusmalli ja kosketusten seurausmalli saadaan ennuste puustovaurioiden määrästä. Koska kuljettaja kuitenkin poistaa työskentelyn yhteydessä kosketuksen saaneita puita, joista osa on vaurioituneita, on laskettu poistomalli, jolla ennustetaan poistettavien kosketuspuiden määrää kuljettajittain ja koko aineistossa. Vähentämällä kosketusmallin ja seurausmallin antamasta vauriopuiden määrästä poistomallin antama puiden määrä, päästään kasvamaan jäävien vauriopuiden määrään.

Vauriopuiden joukossa saattaa kuitenkin olla puita, joihin on kohdistunut kosketus eri työsykleillä. Tämän vuoksi on laskettu mallit ennustamaan todennäköisyyttä sille, että samaan puuhun kohdistuu kosketus eri työsykleillä. Pieneen osaan näistä kosketuspuista on syntynyt vaurio molemmista kosketuksista. Jottei tällaista puuta laskettaisi vauriopuiden määrään kahteen kertaan, on laadittu kahden kosketuksen ja vaurion malli, jolla tällaisten puiden määrää voidaan ennustaa. Näiden puiden määrä on vähennettävä vauriopuiden määrästä todellista vauriopuiden määrää ja vaurioprosenttia laskettaessa.

Yhdistämällä kaikki edelliset mallit saadaan puustovaurioiden ennustemalli, jonka perusteella voidaan laatia vaurioennusteet eri kuljettajien työskentelylle ja koko aineiston perusteella hakkuukonetyölle. Vaurioennustemalliin liittyvät lisäksi vaurion laatua ja sijaintia ennustavat mallit. Malli on rakennettu Excel-taulukkolaskentaohjelmistolle. Mallin syöttötietoina ovat käsiteltävän rungon koko, dm^3, runkoluku/ha työalueella ja hakkuun vuodenaika (talvi, kevät-syksy, kesä). Käytettävät kosketusmallit ja kosketuksen seurausmallit ohjelma kysyy käyttäjältä.

Kaaviokuva puustovaurioiden ennustamisesta esitetään kuvassa 29.



Kuva 29. Kaaviokuva puustovaurioiden ennustamisesta.

7.3.2 Perusteita logistisen regression käytölle

Työntutkimusaineistossa muodostettiin joukko uusia muuttujia, joille annettiin arvo 1 tai 0. Esimerkiksi kosketusmallissa vastemuuttuja y on binäärinen ja se voidaan koodata seuraavasti: y = 1, kun työsyklillä tapahtuu kosketus ja y = 0, kun kosketusta ei tapahdu. Kosketuksen esiintymisen todennäköisyyttä kuvataan parametrilla, joka kertoo satunnaisesti valitun havaintopisteen todennäköisyyden osua luokkaan y = 1. Käytetään tälle todennäköisyysparametrille merkintää π, jolloin

$P(y = 1) = \pi$ ja vastaavasti $P(y = 0) = 1 - \pi$. (Rita & Ranta 1996, s. 2).

Yksinkertaisimmissa kvantitatiivisten muuttujien selitysmalleissa tarkasteltavan muuttujan odotusarvoa selitetään lineaarisen lausekkeen avulla. Vastemuuttuja on siis kategorinen, mutta sen odotusarvo on $E(y) = 1*\pi + 0*(1-\pi) = \pi$, joka on kiinnostuksen kohteena oleva parametri. Yhden selittäjän

regressiomallilla tätä odotusarvoa voitaisiin selittää seuraavasti (Rita & Ranta 1996, s. 3):

$$\pi(x) = \alpha + \beta x \qquad \textbf{(14)}$$

Kosketusmallissa kutakin selittävän muuttujan arvoa x kohti malli antaa todennäköisyysennusteen, että arvolla x syntyy kosketus pystypuuhun.

Vastemuuttujan ollessa binäärinen malli (**14**) ei kuitenkaan sovellu käytettäväksi sellaisenaan. Kulmakertoimen β ollessa negatiivinen mallin antamat ennusteet kosketuksen todennäköisyydelle pienenevät selittävän muuttujan x arvon kasvaessa, ja suurilla muuttujan x arvoilla ennuste olisi pienempi kuin 0. Todennäköisyys ei kuitenkaan voi olla pienempi kuin 0. Vastaavasti β:n ollessa positiivinen suurilla x:n arvoilla ennuste saattaa olla suurempi kuin 1, mikä ei myöskään ole mahdollista. Malli ei ota huomioon vastemuuttujan erityisluonnetta välille [0,1] rajoittuvana suureena.

Tavanomaisessa regressiomallissa satunnaisvaihtelun oletetaan olevan yhtä suurta kaikilla selittävän muuttujan arvoilla. Todennäköisyysparametria selitettäessä varianssit riippuvat selittäjän arvosta. Vaihtelu on pienimmillään lähellä arvoja 0 ja 1 olevia todennäköisyyksiä vastaavilla selittäjien arvoilla, ja suurimmillaan todennäköisyyden ollessa lähellä arvoa 0,5. Varianssien vaihtelu (heteroskedastisuus) aiheuttaa ongelmia mallin parametrien estimoinnissa. Parametrien estimoinnissa käytettävä pienimmän neliösumman menetelmä pitää kaikkia havaintoarvoja yhtä luotettavina olettaen niihin liittyvän satunnaisvaihtelun olevan yhtä voimakasta vakiovarianssin vuoksi. Varianssien kuitenkin vaihdellessa pienimmän neliösumman menetelmä tuottaa tehottomia estimaatteja ja estimoitujen parametrien varianssiestimaatit tulevat harhaisiksi (Rita & Ranta 1996, s. 4 - 5).

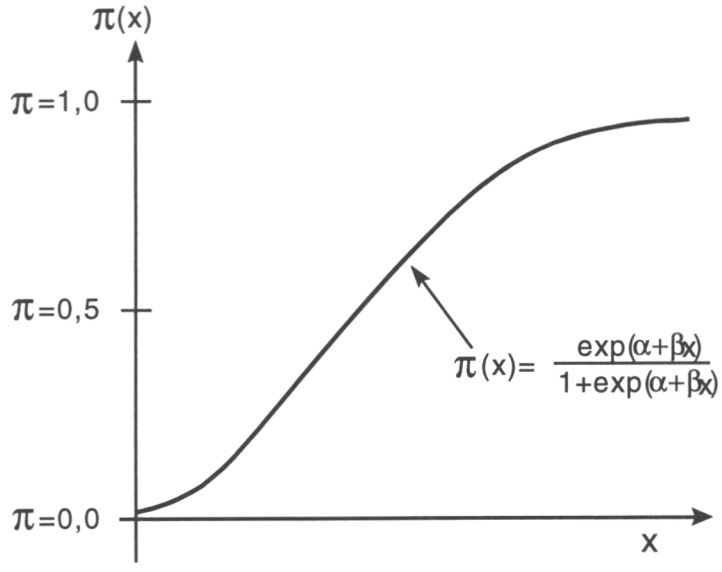
Vastemuuttujan odotusarvo todennäköisyyttä kuvaavana parametrinä vaikuttaa mallin parametrien tulkintaan. Regressiomalleissa kulmakertoimen β yhden yksikön kasvu kasvattaa vastemuuttujaa eli todennäköisyyttä aina β yksikköä. Tällainen tulkinta ei ota huomioon muutoksen suhteellisuutta (Ranta ym. 1989, s. 375). Luonteva tulkinta saadaan, kun selittävässä muuttujassa tapahtuva kiinteän suuruinen muutos vaikuttaa tarkasteltavan ilmiön esiintymis-todennäköisyyteen absoluuttisesti mitattuna sitä vähemmän, mitä lähempänä todennäköisyys on arvoja 0 tai 1. Tällaisen ilmiön mallitus onnistuu sallimalla epälineaarinen, käyräviivainen yhteys (kuva 30) todennäköisyyden $\pi(x)$ ja selittävän muuttujan välillä. Tällaista yhteyttä kuvaa seuraava malli (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 6, Rita & Ranta 1996, s. 6):

$$\pi(x) = \frac{\exp(\alpha + \beta x)}{1 + \exp(\alpha + \beta x)} \qquad \textbf{(15)}$$

Mallissa exp tarkoittaa eksponenttifunktiota. Kantalukuna on Neperin luku e, jonka likiarvo on 2,717. Koska eksponenttifunktion arvot ovat aina positiivisia, muunnoksen arvo on aina välillä [0,1].

Edellisestä yhtälöstä saadaan muokkaamalla:

$$\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)} = \exp(\alpha + \beta x) \qquad \textbf{(16)}$$



Kuva 30. Logistinen malli.

Kun yhtälöstä **(16)** otetaan puolittain luonnollinen logaritmi, saadaan:

$$\ln\left[\frac{\pi(x)}{1 - \pi(x)}\right] = \alpha + \beta x \qquad \textbf{(17)}$$

Yhtälön **(17)** vasemmalla puolella oleva onnistumistodennäköisyyteen π(x) kohdennettu muunnos on nimeltään logit-muunnos, jonka avulla toden-

näköisyydestä saatuihin muunnettuihin arvoihin sovitetaan lineaarinen malli. Tämän tyyppisiä malleja kutsutaan logistisiksi regressiomalleiksi tai (lineaarisiksi) logit-malleiksi. Nimitys kertoo, että muuntamalla todennäköisyyttä logit-muunnoksella sen vaihtelu voidaan kuvata selittävän muuttujan lineaarisella lausekkeella (Rita & Ranta 1996, s. 8).

7.3.3 Logistisen mallin tulkinta ja parametrien testaus

Logit-muunnoksella selittävän muuttujan vaikutus linearisoituu, mutta todennäköisyydet on mitattava logistisella asteikolla. Parametrien tulkitsemisessa käytetäänkin todennäköisyyksistä π ja $1-\pi$ muodostettua suhdetta $\frac{\pi}{1-\pi}$, jota kutsutaan vedonlyöntisuhteeksi (odds). Vedonlyöntisuhteen avulla voidaan yksinkertaisesti kuvata kaikki todennäköisyyksien mahdolliset arvot. Jokaista todennäköisyyttä π vastaa yksi vedonlyöntisuhteen arvo $\frac{\pi}{1-\pi}$.

Parametrien α ja β tulkinta perustuu vedonlyöntisuhteeseen. Vedonlyöntisuhteiden muuttumista yhden yksikön lisäyksen vaikutuksesta kuvaa niiden osamäärä (Rita & Ranta 1996, s. 11):

$$\frac{\pi(x+1)}{1-\pi(x+1)} \Big/ \frac{\pi(x)}{1-\pi(x)} \qquad \textbf{(18)}$$

Vedonlyöntisuhteiden osamäärä on käännös englanninkielisestä termistä odds ratio, ja siitä käytetään myös nimitystä ristitulosuhde (Rita & Ranta 1996, s. 11). Kun ristitulosuhteeseen sijoitetaan mallin **(16)** mukaiset esitykset, saadaan:

$$\frac{\exp[\alpha+\beta(x+1)]}{\exp(\alpha+\beta x)} = e^{\beta} \qquad \textbf{(19)}$$

Ristitulosuhde riippuu pelkästään parametrista β. Vedonlyöntisuhde $\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)}$ kasvaa e^{β}–kertaiseksi selittävän muuttujan x arvon kasvaessa yhdellä yksiköllä. Malli on multiplikatiivinen eli se ottaa huomioon suhteelliset muutokset.

Logistisilla regressiomalleilla mallin sopivuuden sekä yksittäisten parametrien testaus perustuu logaritmiseen uskottavuusfunktioon (log likehood function). Täyden eli kyllästetyn mallin ja rajoitetun mallin eroa testataan uskottavuusosamäärätestillä, josta saatavalle suureelle käytetään nimitystä

deviance. Deviance-suure määritellään seuraavasti (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 14):

$$D = -2\sum_{i=1}^{n}\left[y_i \ln\left(\frac{\hat{\pi}(x_i)}{y_i}\right) + (1-y_i)\ln\left(\frac{1-\hat{\pi}(x_i)}{1-y_i}\right)\right] \qquad \textbf{(20)}$$

missä $y_i = 0$ tai 1

$\hat{\pi}(x_i)$ = todennäköisyyden estimaatti

Deviance-suure on asymptoottisesti jakautunut χ^2-jakauman mukaisesti vapausastein (n - p), missä n on havaintojen lukumäärä ja p parametrien lukumäärä logistisessa mallissa. Deviance-suure on sisällöllisesti rinnastettavissa lineaarisen regression jäännösvirheeseen (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 14).

Mallin sopivuutta testataan yhteensopivuustestillä, jossa testataan mallin ja aineiston yhteensopivuutta. Suuret deviance-arvot johtavat pieneen testisuureen p-arvoon, jolloin hypoteesi rajoitetun mallin paikkansa pitävyydestä hylätään. Pieni p-arvo logistista mallia testattaessa on "huono" asia toisin kuin tavallista regressiomallia testattaessa (Lappi 1993, s. 116).

Mallin hyvyyttä voidaan arvioida vertaamalla deviance-arvoa vapausasteiden lukumäärään (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 139). Deviance-arvon ollessa lähellä vapausasteiden lukumäärää tai vastaavasti näiden lukujen suhteen ollessa lähellä lukua 1 mallia voidaan pitää hyvänä.

Mallin parametrien estimoinnissa tietyn muuttujan sisältämän mallin deviance-arvoa verrataan malliin, josta kyseinen muuttuja puuttuu. Deviance-arvojen erotusta verrataan χ^2-jakaumaan hypoteesin H_0: $\beta=0$ testaamiseksi. Mallin parametrien estimointiin sopii myös Waldin testisuure W, joka saadaan seuraavasti (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 17):

$$W = \frac{\hat{\beta}}{\hat{SE}(\hat{\beta})} \qquad \textbf{(21)}$$

Waldin testisuure saadaan siis jakamalla parametrin estimaatin arvo parametrin keskivirheellä. Myös Waldin testisuureen neliötä voidaan käyttää parametrien estimointiin. Käsillä olevassa tutkimuksessa käytetään juuri Waldin testisuureen neliötä. Waldin testisuuretta verrataan normaalijakaumaan, Waldin testin neliötä vastaavasti χ^2-jakaumaan.

Käsillä olevassa tutkimuksessa muuttujien valinnassa on käytetty pääasiassa askeltavaa logistista regressiota. Askeltavasta logistinen regressioanalyysi on tehty taaksepäin (engl. backward elimination). Muuttujien valinnassa ja muuttujien kertoimien testauksessa Waldin testisuureen neliön p-arvolle ei ole asetettu mitään kiinteää merkitsevyysrajaa, vaan malleihin on valittu muuttujat valinnan raja-arvoja mallikohtaisesti soveltaen. Joissakin tapauksissa muuttujan vaikutusta mallin sopivuuteen testattiin vertaamalla muuttujan sisältämän mallin deviance-arvoa malliin, jossa kyseinen muuttuja ei ollut mukana. Mallin ja aineiston yhteensopivuuden testauksessa on tarkasteltu deviance-arvoa suhteessa vapausasteiden määrään ja yhteensopivuustestin p-arvoa.

7.3.4 Kosketusmallit

Kosketusmallit kuvaavat kosketusten määrää eri työoloissa. Kosketusmallit on laskettu koko työsyklille ja eri työvaiheille. Kosketuksia ennustettaessa avainasemassa ovat puun kaato ja puun siirtelystä ja karsinnasta koostuva puun käsittely, joiden osuus kaikista kosketuksista oli yli 90 %. Hakkuulaitteen viennin ja puun katkaisuvaiheen osuus kosketuksista oli vajaa 5 % siirtymisten, järjestelyjen ja raivauksen yhteenlasketun osuuden ollessa vain 2,2 %.

Koko työsykliä kuvaava kosketusmalli (taulukko 39) perustuu koko havaintoaineistoon, josta on laskettu kuljettajakohtaiset ja koko aineistoa kuvaavat kosketusmallit. Kuljettajakohtaisten mallien laatimista vaikeutti aineiston epätasainen jakauma. Kuljettaja C:n aineisto 465 käsiteltyä puuta ja 123 kosketusta oli riittämätön tarkan kuljettajakohtaisen mallin laatimiseen.

Taulukko 39. Ennustemalli sille, että työsyklillä syntyy (1) tai ei synny (0) kosketus. Perustasona kuljettaja D.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cx_2 + d_1k_1 + d_2k_2 + d_3k_3 \qquad (22)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä, kpl/ha työalueella
k_1 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, =1, jos kuljettaja = C, muulloin 0

a = vakio
b, c,…,d_3 = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma		N		
7973	1		1548		
	0		6425		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-2,921	0,0997	858,475	0,0001	
b	0,003	0,0002	259,250	0,0001	1,003
c	0,001	0,0001	112,645	0,0001	1,001
d_1	-0,008	0,0882	0,007	0,9313	0,992
d_2	0,615	0,0692	79,021	0,0001	1,850
d_3	0,495	0,1267	15,246	0,0001	1,640
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	4548,3	4331	0,0106		

Mallin kertoimien merkitsevyyden testauksessa Waldin testin neliötä verrattiin χ^2-jakaumaan. Waldin neliöiden jälkeiset p-arvot kertovat vakion ja kertoimien poikkeamisesta 0:sta, valemuuttujien kohdalla poikkeavuutta perustasosta. Ristitulosuhde puolestaan kuvaa vedonlyöntisuhteen, $\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)}$, muutosta muuttujan arvon lisääntyessä yhden yksikön. Ristitulosuhde riippuu pelkästään muuttujan kertoimesta. Esimerkiksi käsiteltävän rungon koon kasvaessa 1 dm^3:n vedonlyöntisuhde kasvaa $e^{0,003}$-kertaiseksi eli 1,003-kertaiseksi. Vastaavasti rungon koon kasvaessa 100 dm^3 vedonlyöntisuhde muuttuu $1,003^{100}$ eli 1,35-kertaiseksi.

Käsiteltävän rungon koko, dm^3, puiden lukumäärä/ha työalueella ja kuljettaja olivat keskeiset selittäjät kosketuksen synnylle. Waldin neliöiden jälkeen esitetyt p-arvot ovat pieniä lukuun ottamatta kuljettajan A kertoimen p-arvoa. Pienet p-arvot merkitsevät vakion ja muuttujien x_1 ja x_2 kertoimien poikkeavan nollasta. Valemuuttujista kuljettajien B ja C kertoimet poikkesivat selvästi perustasona olevan kuljettajan D kertoimesta. Sen sijaan kuljettajan A kerroin ei poikennut perustasosta.

Mallin ja aineiston yhteensopivuutta kuvaava deviance-arvo on lähellä vapausasteiden lukumäärää, lukujen suhde on 1,05, joten Hosmer & Lemeshowin (1989, s. 139) esittämän nyrkkisäännön mukaan mallin sopivuus on hyvä. Yhteensopivuustestissä deviance-arvoa verrataan χ^2-jakaumaan. Testisuureen p-arvon ollessa pieni hypoteesi rajoitetun mallin paikkansa pitävyydestä hylätään. Testissä saatu p-arvo 0,0106 on verraten pieni. Suuressa aineistossa mallin ja aineiston erot näkyvät helposti ja johtavat pieniin p-arvoihin. Kokonaisuutena mallin ja aineiston yhteensopivuutta voidaan pitää

kohtuullisena. Mallista voidaan todennäköisyys p kosketuksen synnylle ratkaista seuraavasti (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 6):

$$p = \frac{e^{\log it(p)}}{1 + e^{\log it(p)}} \qquad (23)$$

missä e = 2,718 = ln kantaluku

Käsiteltävän rungon koon, dm^3, ja työalueella olevien puiden lukumäärän vaikutusta kosketuksen synnyn todennäköisyyteen kuvaa taulukko 40.

Jos taulukosta 39 lasketaan vedonlyöntisuhteet $\frac{\pi(x)}{1-\pi(x)}$, todetaan vedonlyöntisuhteiden kuljettajien välillä pysyvän muuttumattomina rungon koon ja puiden lukumäärän työalueella muuttuessa. Esimerkiksi kuljettajien C ja D (perustaso) välinen vedonlyöntisuhde on ristitulosuhteen ilmoittama 1,64, kuljettajien B ja D välinen vastaavasti 1,85.

Vuodenajan vaikutusta kosketusherkkyyteen tutkittiin kuljettajien B ja D työssä, koska heitä koskevaa aineistoa oli eri vuodenajoilta (taulukko 41).

Taulukko 40. Käsiteltävän rungon koon, dm^3, ja työalueella olevien puiden lukumäärän vaikutus kosketuksen synnyn todennäköisyyteen.

Kuljettaja	Puiden lukumäärä työalueella, runkoa/ha				
	1000	1500	2000	1000	1500
	Rungon koko, dm^3				
	100	100	100	200	200
A	0,11	0,14	0,18	0,14	0,18
B	0,19	0,23	0,28	0,24	0,29
C	0,17	0,21	0,26	0,22	0,27
D	0,11	0,14	0,18	0,14	0,18

Taulukko 41. Ennustemalli vuodenajan vaikutuksesta kosketusherkkyyteen. Perustasona kuljettaja D ja talviaika.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cx_2 + dk + ev \qquad (24)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä, kpl/ha työalueella
k = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = B, muulloin 0

v = valemuuttuja, = 1, jos maa on lumeton, muulloin 0

a = vakio
b, c, d, e = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma		N		
	1		1174		
	0		4731		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-3,091	0,1234	627,414	0,0001	
b	0,003	0,0002	133,274	0,0001	1,003
c	0,001	0,00006	87,354	0,0001	1,001
d	0,699	0,0730	91,678	0,0001	2,012
e	0,235	0,0752	9,726	0,0018	1,264
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	3176	3374,9	0,0071		

Lumettoman ajan valemuuttujan kertoimen p-arvo on 0,0018. Vuodenaika vaikutti siis selvästi kosketuksen todennäköisyyteen. Tähän on syynä juurenniskojen suojattomuus lumettomana aikana. Lumettomana aikana kosketuksen vedonlyöntisuhde oli 1,26-kertainen talviaikaan verrattuna. Rungon koon ollessa 200 dm^3 ja puiden lukumäärän työalueella ollessa 1500 runkoa/ha kosketuksen synnyn todennäköisyydet kuljettajilla B ja D lumettomana aikana ja talvella olivat seuraavat:

Kuljettaja	Kosketuksen synnyn todennäköisyys	
	Vuodenaika	
	Talvi	Muut vuodenajat
B	0,27	0,32
D	0,15	0,19

Mallin ja aineiston yhteensopivuus on kohtuullinen. Deviance-arvo on lähellä vapausasteiden määrää, mutta p-arvo on suhteellisen pieni 0,0071.

Koko tutkimusaineiston käsittävä kosketusmalli, jossa kuljettaja ei ole selittäjänä, esitetään taulukossa 42.

Taulukko 42. Ennustemalli sille, että työsyklillä syntyy (1) tai ei synny (0) kosketus.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cx_2 + dv \quad (25)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä, kpl/ha työalueella
v = valemuuttuja, = 1, jos maa on lumeton, muulloin 0

a = vakio
b, c, d = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma		N		
7973	1		1548		
	0		6425		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-2,687	0,0911	899,338	0,0001	
b	0,003	0,0002	304,338	0,0001	1,003
c	0,001	0,0001	100,086	0,0001	1,001
d	0,123	0,0586	4,433	0,0353	1,131
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	4349,8	4000	0,0001		

Käsiteltävän rungon koko oli tärkein kosketuksen synnyn todennäköisyyden selittäjä. Puiden lukumäärä/ha työalueella vaikutti myös merkittävästi kosketuksen synnyn todennäköisyyteen. Vuodenajan vaikutuksen kertoimen p-arvo on 0,035. Vuodenaika vaikutti kosketuksen synnyn todennäköisyyteen, mutta se ei ollut selitysvoimaltaan verrattavissa rungon kokoon ja puuston määrään kosketuksen synnyn selittäjänä. Mallin ja aineiston yhteensopivuus on kohtuullinen

Työsyklejä, joissa tapahtui kosketus kahteen puuhun, oli koko tutkimusaineistossa yhteensä 120 kappaletta, 1,5 % kaikista työsykleistä. Kahden kosketuksen syntyyn vaikuttavia tekijöitä olivat käsiteltävän rungon koko, puiden lukumäärä työalueella, korjuuaika ja kuljettaja. Kosketus kahteen puuhun syntyy yleensä kaadettavan puun osuessa puihin, tai siten, että toinen kosketus syntyy puuta kaadettaessa ja toinen puuta käsiteltäessä. Kahden kosketuksen synnyn todennäköisyyttä kuvaa taulukossa 43 esitettävä malli.

Taulukko 43. Kahden kosketuksen ennustemalli. Perustaso kuljettaja D ja talviaika.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cx_2 + d_1k_1 + d_2k_2 + d_3k_3 + ev \quad (26)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä, kpl/ha työalueella
k_1 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
v = valemuuttuja, = 1, jos maa on lumeton, muulloin 0

a = vakio
b, c,..., e = muuttujien kertoimet

		Vastemuuttujan jakauma	N		
Havaintoja		1	118		
7973		0	7855		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-7,420	0,4027	339,467	0,0001	
b	0,004	0,0004	90,908	0,0001	1,004
c	0,001	0,0001	44,272	0,0001	1,001
d_1	-0,005	0,4765	0,0001	0,9919	0,995
d_2	1,177	0,2465	22,778	0,0001	3,244
d_3	1,523	0,4481	11,546	0,0007	4,584
e	0,828	0,2594	10,180	0,0014	2,288
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	926,9	4450	1,0000		

Käsiteltävän rungon koko ja puiden lukumäärä/ha työalueella olivat tärkeimmät selittäjät kahden kosketuksen synnylle työsyklillä. Kuljettajien B ja C työskentelyssä todennäköisyys kahden kosketuksen synnylle oli tilastollisesti merkitsevästi suurempi kuin perustasona olevalla kuljettajalla D. Kuljettajalla A todennäköisyys kahden kosketuksen synnylle ei puolestaan poikennut kuljettaja D tasosta. Lumettomana aikana kahden kosketuksen synnyn vedonlyöntisuhde on lähes 2,3-kertainen talviaikaan verrattuna. Mallin ja aineiston yhteensopivuus on hyvä.

Kosketusmallit laskettiin myös eri työvaiheille. Kaatovaiheen kosketukset sisälsivät yli kaksi kolmasosaa kaikista kosketuksista. Taulukossa 44 esitetään kaatovaiheen kosketusten ennustemalli.

Taulukko 44. Kaatovaiheen kosketusmalli. Perustasona kuljettaja D.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cx_2 + d_1k_1 + d_2k_2 + d_3k_3 \quad (27)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä, kpl/ha työalueella
k_1 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = C, muulloin 0

a = vakio
b, c,..., d_3 = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma	N
7973	1	1079
	0	6894

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-3,440	0,1140	909,752	0,0001	
b	0,003	0,0002	215,651	0,0001	1,003
c	0,001	0,0001	111,837	0,0001	1,001
d_1	-0,031	0,1035	0,091	0,7630	0,969
d_2	0,601	0,0799	56,606	0,0001	1,825
d_3	0,483	0,1441	11,254	0,0008	1,621

Yhteensopivuuden testaus

Deviance	Df	p-arvo
3945,4	4331	1,0000

Kaadettavan rungon koko, dm^3, ja puiden lukumäärä/ha työalueella olivat keskeiset kaatovaiheen kosketusta selittävät tekijät. Kuljettajista B ja C poikkesivat perustasona olevasta kuljettajasta D. Kuljettajilla A ja D kaatovaiheen kosketusten todennäköisyydet eivät eronneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Mallin sopivuus on erittäin hyvä. Deviance-arvo on lähellä vapausasteiden lukumäärää, ja testisuureen p-arvo 1,000 tukee hypoteesia rajoitetun mallin paikkansa pitävyydestä.

Puun käsittelyvaiheessa (siirto puun kanssa, karsinta ja katkonta) syntyi noin neljännes kaikista kosketuksista. Ennustemalli puun käsittelyvaiheen kosketuksille esitetään taulukossa 45.

Taulukko 45. Puun käsittelyvaiheen kosketusmalli. Perustasona kuljettaja D ja talviaika.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cx_2 + d_1k_1 + d_2k_2 + d_3k_3 + ev \quad (28)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
x_2 = puiden lukumäärä, kpl/ha työalueella
k_1 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = A, muulloin 0
k_2 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = B, muulloin 0
k_3 = valemuuttuja, = 1, jos kuljettaja = C, muulloin 0
v = valemuuttuja, = 1, jos maa on lumeton, muulloin 0

a = vakio
b, c,..., e = muuttujien kertoimet

	Vastemuuttujan jakauma	N
Havaintoja	1	445
7973	0	7528

Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-4,306	0,1973	476,366	0,0001	
b	0,0026	0,0003	80,998	0,0001	1,002
c	0,00026	0,0001	6,936	0,0084	1,000
d_1	0,577	0,1930	8,927	0,0028	1,780
d_2	0,686	0,1219	31,649	0,0001	1,985
d_3	0,708	0,2609	7,357	0,0067	2,029
e	0,6818	0,1350	25,469	0,0001	1,976

Yhteensopivuuden testaus

Deviance	Df	p-arvo
2303,8	4450	1,0000

Käsiteltävän rungon koko, dm^3, vuodenaika ja kuljettaja olivat tärkeimmät puun käsittelyvaiheen kosketusten selittäjät. Lumettomana aikana puun käsittelyvaiheen kosketuksen vedonlyöntisuhde oli lähes 2-kertainen talviaikaan verrattuna. Mallin sopivuus on hyvä.

Hakkuulaitteen viennissä puulle, asettelussa ja katkaisussa syntyi kosketuksia varsin satunnaisesti; työvaiheen osuus kaikista kosketuksista oli 4,1 %. Työvaiheen kosketusten kokonaismäärä, 60 kosketusta, antoi varsin rajalliset mahdollisuudet selvittää kosketuksen syntyyn vaikuttavia tekijöitä. Työvaiheen kosketusmallia laadittaessa kokeiltiin työalueen puuston tiheyden, runko-

luvun/ha ja kosketusten yhteyttä. Koko aineistossa puuston tiheydellä ei ollut tilastollista merkitystä kosketusherkkyyteen. Kuljettajilla B ja D kosketuksen todennäköisyys kuitenkin kasvoi jonkin verran puuston tiheyden lisääntyessä.

Hakkuulaitteen viennin, asettelun ja katkaisun kosketukset kuvaavat tutkimuskuljettajien taitoa ja huolellisuutta, sillä työvaiheen kosketukset olivat useimmiten kuljettajasta johtuvia Kosketuksen todennäköisyydet tutkimuskuljettajilla hakkuulaitteen viennissä puulle, asettelussa ja katkaisussa olivat seuraavat:

Kuljettaja	Kosketuksen synnyn todennäköisyys
A	0,006
B	0,010
C	0,020
D	0,004

Järjestelyjen, raivauksen ja siirtymisten merkitys kosketusten aiheuttajana oli vähäinen näiden työvaiheiden käsittäessä yhteensä 2,2 % kaikista kosketuksista. Työvaiheissa tapahtuvat kosketukset olivat sattumanvaraisia, eikä niillä välttämättä ollut yhteyttä työoloihin. Kosketusten sattumanvaraisuuden ja vähäisen määrän vuoksi kosketusmallien esittäminen näille työvaiheille ei ole perusteltua.

7.3.5 Kosketusten seurausmallit

Kosketusten seurausmalli kuvaa eri työvaiheissa syntyneiden kosketusten seurauksia ja niihin vaikuttavia tekijöitä. Kaikkien kuljettajien kosketusaineistoja käsiteltiin yhdessä, koska kosketuksen seurausten voidaan olettaa olevan kuljettajasta riippumattomia. Työntutkijan arvioimaa kosketuksen voimaa ei otettu mukaan kosketuksen seurauksia selittäviä muuttujia valittaessa.

Koko työsyklin kosketusten seurausmallin aineiston muodostivat kaikki työntutkimuksen aikana kosketuksen saaneet puut, joita kuljettaja ei työskentelyn yhteydessä poistanut, yhteensä 1049 kosketusta. Kosketusten seurauksia kuvaa taulukossa 46 esitettävä malli.

Taulukko 46. Ennustemalli sille, että kosketuksesta syntyy (1) tai ei synny (0) vaurio. Perustaso muu vuodenaika kuin kesä.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cv \quad (29)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
v = valemuuttuja, = 1, jos korjuuaika = kesä, muulloin 0

a = vakio
b, c = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma	N		
1049	1	285		
	0	764		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-1,496	0,1242	145,154	0,0001	
b	0,002	0,0004	21,236	0,0001	1,002
c	0,562	0,1617	12,072	0,0005	1,754

Yhteensopivuuden testaus		
Deviance	Df	p-arvo
196,6	149	0,0055

Kosketuksen aiheuttaneen rungon koko oli tärkein vaurion synnyn selittäjä. Myös vuodenaika vaikutti kosketusten seurauksiin. Kesällä vaurion synnyn vedonlyöntisuhde oli 1,7-kertainen muihin vuodenaikoihin verrattuna. Käsiteltävän rungon koon 100 dm^3:n kasvu lisäsi vaurion synnyn vedonlyöntisuhdetta 19 %. Deviance-arvo on suhteellisen lähellä vapausasteiden määrää, ja yhteensopivuustestin p-arvo 0,006. Mallin sopivuutta voidaan pitää kohtuullisena.

Todennäköisyydet vaurion synnylle 100 dm^3:n ja 200 dm^3 rungon koolla olivat kesällä ja muina vuodenaikoina seuraavat:

	Vuodenaika	
Rungon koko, dm^3	Kesä	Muut vuodenajat
100	0,32	0,21
200	0,36	0,24

Kaatovaiheen kosketukset käsittivät lähes 70 % kaikista kosketuksista. Kaatovaiheen kosketuksen seurausvaikutuksia kuvaa taulukossa 47 esitettävä malli.

Taulukko 47. Kaatovaiheen kosketusten seurausmalli. Perustaso muu vuodenaika kuin kesä.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cv \quad \textbf{(30)}$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
v = valemuuttuja, = 1, jos korjuuaika = kesä, muulloin 0

a = vakio
b, c = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma		N		
657	1		159		
	0		498		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-1,717	0,1674	105,111	0,0001	
b	0,002	0,0005	13,576	0,0002	1,002
c	0,656	0,2047	10,281	0,0013	1,927
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	189,6	136	0,0016		

Kaadettavan rungon koko ja vuodenaika vaikuttivat tilastollisesti merkitsevästi vaurion syntyyn kaatovaiheen kosketuksista. Kesällä vaurion synnyn vedonlyöntisuhde oli lähes kaksinkertainen muihin vuodenaikoihin verrattuna. Mallin sopivuus on kohtuullinen.

Puun käsittelyvaiheen kosketuksista 16,7 % tapahtui puuta siirrettäessä ja 83,3 % puuta karsittaessa. Yli 90 % kosketuksista oli käsiteltävän puun aiheuttamia, loput jakautuivat nosturin ja hakkuulaitteen osalle. Puun käsittelyvaiheen kosketuksien seurauksia kuvaa taulukossa 48 esitettävä malli.

Taulukko 48. Puun käsittelyvaiheen kosketusten seurausmalli. Perustasona muu aika kuin kesä.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cv \quad (31)$$

missä
x_1= käsiteltävän rungon koko, dm^3
v = valemuuttuja, =1, jos korjuuaika = kesä, muulloin 0

a = vakio
b, c = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma	N		
304	1	95		
	0	209		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-1,286	0,2152	35,694	0,0001	
b	0,002	0,0006	7,009	0,0081	1,002
c	0,621	0,3180	3,817	0,0507	1,861

Yhteensopivuuden testaus		
Deviance	Df	p-arvo
121,8	101	0,0777

Käsiteltävän rungon koko ja vuodenaika olivat keskeiset selittäjät vaurion synnylle puun käsittelyvaiheen kosketuksista. Deviance-arvo on lähellä vapausasteiden lukumäärää, ja yhteensopivuustestin p-arvo verraten suuri 0,08. Mallin sopivuutta voidaan täten pitää kohtuullisena.

Hakkuulaitteen viennissä puulle, asettelussa ja katkaisussa syntyi 4,1 % kosketuksista ja 5,7 % vaurioista. Kosketuksen seurauksiin vaikuttavien tekijöiden tarkasteluun aineisto oli varsin pieni, ainoastaan 35 havaintoa. Työvaiheelle laskettiin koko vuotta kuvaava, ainoastaan vakion sisältävä malli. Mallin antama todennäköisyys vaurion synnylle oli 0,371. Verraten suuri vaurion synnyn todennäköisyys kuvaa työvaiheen kosketusten poikkeavuutta esimerkiksi kaatovaiheen kosketuksista. Hakkuulaitteen viennissä puulle, asettelussa ja katkaisussa tapahtuvat kosketukset olivat voimakkaita nosturin tai hakkuulaitteen aiheuttamia kolhaisuja, joista syntyi verraten suurella todennäköisyydellä vaurio.

Kosketukset siirtymisessä, pölkkyjen tai hakkuutähteiden järjestelyssä ja raivauksessa olivat myös satunnaisia; niiden yhteenlaskettu osuus kaikista kosketuksista oli 2,2 %. Aineiston vähäisyyden vuoksi työvaiheille ei esitetä

kosketusten seurausmalleja. Siirtymisvaiheen kosketukset kuitenkin erosivat hakkuutyön muista kosketuksista, sillä neljästä siirtymisessä tapahtuneesta kosketuksesta kolme johti vaurioon.

Kosketuspuista poistettiin keskimäärin 36,6 %. Kuljettajittain poistettujen kosketuspuiden keskimääräinen osuus oli 32,0 - 44,1 %. Poistetuista kosketuspuista 88,3 % arvioitiin metsänhoidollisesti poistettaviksi ja 11,7 % kasvatettaviksi. Jotta saataisiin todenmukainen kuva korjuun puustovaurioiden määrästä, puustovaurioita ennustettaessa on otettava huomioon kosketusten saaneiden puiden poistaminen.

Kosketuksen saaneiden puiden poistomalliin ehdotettiin mukaan myös puiden lukumäärää/ha työalueella kosketushetkellä. Saattaisi olla mahdollista, että vaurioituneen kosketuspuun poistaminen olisi todennäköisempää, jos työalueella olisi mahdollisimman paljon vaihtoehtoisia, kasvatettavia puita. Puiden lukumäärä työalueella ei kuitenkaan tullut poistomalliin selittäväksi tekijäksi. Kuljettaja jäi ainoaksi kosketuspuiden poistamista selittäväksi tekijäksi. Todennäköisyydet kosketuspuun poistamiselle työn edetessä olivat kuljettajittain seuraavat:

Kuljettaja	Todennäköisyys kosketuspuun poistamiselle
A	0,32
B	0,34
C	0,34
D	0,44

Laskettaessa työntutkimuksen perusteella vaurioprosenttia leimikolle vauriopuiden määrä jaetaan jäävän puuston määrällä. Vaurioprosenttia laskettaessa on otettava huomioon sellaiset kahden kosketuksen puut, joissa molemmista kosketuksista on syntynyt vaurio. Tällainen puu on laskettava vauriopuiden määrään vain kerran. Tämän vuoksi laskettiin ennusteet sille, että samaan puuhun kohdistuu kaksi kosketusta, joista molemmista seuraa vaurio. Kuljettajilla A ja C ei ollut yhtään tällaista tapausta. Kuljettajalla B todennäköisyys kahdelle samaan puuhun syntyvälle vauriolle kahdesta eri kosketuksesta oli 0,01, kuljettajalla D vastaavasti 0,004.

Myös vaurioiden laadun ja sijainnin ennustamiseksi laskettiin mallit. Vauriot jaettiin mallin laadinnassa pintavaurioihin ja syvävaurioihin. Katkovauriot, joita oli 0,7 % kaikista vaurioista, sisällytettiin syvävaurioihin. Vaurion laatua ennustaa taulukossa 49 esitettävä malli.

Taulukko 49. Vaurion laatua ennustava malli. Ennustemalli sille, että syntyvä vaurio on syvävaurio (1) tai pintavaurio (0).

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 \quad (32)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3

a = vakio
b = muuttujan kerroin

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma		N		
285	1		43		
	0		242		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-2,339	0,2689	75,610	0,0001	
b	0,002	0,0007	10,597	0,0011	1,002
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	93,6	99	0,6336		

Käsiteltävän rungon koko, dm^3, oli ainoa vaurion laatua selittävä tekijä. Käsiteltävän rungon koon 100 dm^3:n kasvu lisäsi syvävaurion synnyn vedonlyöntisuhdetta 26 %. Mallin ja aineiston yhteensopivuus on hyvä; deviance-arvo on lähellä vapausasteiden määrää ja yhteensopivuustestin p-arvo 0,63.

Vauriot jaettiin sijaintinsa perusteella runko- ja juurenniskavaurioihin. Talvella lumen suojatessa juurenniskoja käytännössä kaikki hakkuuvaiheen vauriot olivat runkovaurioita. Sulan maan aikana hakkuukonetyössä syntyi myös juurenniskavaurioita. Juurenniskavauriot syntyivät pääosin karsinta-katkontavaiheessa, jolloin suuria puita siirrettäessä syntyy kosketuksia juurenniskoihin. Vaurion sijaintia kuvaa taulukossa 50 esitettävä malli.

Taulukko 50. Vaurion sijaintimalli. Ennustemallit sille, että syntyvä vaurio on juurenniskavaurio (1) tai runkovaurio (0). Perustasona talviaika.

$$\text{logit}(p) = a + bx_1 + cv \quad (33)$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
v = valemuuttuja, = 1, jos maa on lumeton, muulloin 0

a = vakio
b, c = muuttujien kertoimet

Havaintoja	Vastemuuttujan jakauma		N		
283	1		21		
	0		262		
Kerroin	Kertoimen estimaatti	Keskivirhe	Waldin testisuure	p-arvo	Ristitulo-suhde
a	-5,190	1,0229	25,746	0,0001	
b	0,001	0,0006	3,221	0,0727	1,001
c	2,976	1,0335	8,291	0,0040	19,607
	Yhteensopivuuden testaus				
	Deviance	Df	p-arvo		
	75,7	110	0,9948		

Lumettomuus oli tärkein vaurion sijainnin selittäjä rungon koon ollessa toinen tilastollisesti merkitsevä selittäjä. Vedonlyöntisuhde juurenniskavaurion synnylle lumettomana aikana oli lähes 20-kertainen talviaikaan verrattuna. Mallin antama todennäköisyys sille, että 200 dm^3:n puun aiheuttama vaurio on juurenniskavaurio, oli talvella 0,007 ja lumettomana aikana 0,121. Deviance-arvo on lähellä vapausasteiden lukumäärää ja yhteensopivuustestin p-arvo 0,99, joten mallin sopivuus on hyvä.

7.3.6 Mallien toimivuus

Edellä esitetyt mallit kuvaavat tekijöitä, jotka ovat selittäneet parhaiten esimerkiksi kosketuksen tai kosketuksesta syntyvän vaurion todennäköisyyttä mallien pohjana olevassa aineistossa. Malleja esitettäessä olisi kuitenkin pystyttävä myös yleisemmin arvioimaan mallien toimivuutta. Montgomeryn & Peckin (1992, s. 443) mukaan mallien toimivuuden (engl. validation) tarkastelulla tutkitaan, toimivatko mallit todellisessa käyttöympäristössään.

Mallin toimivuuden tarkastelun tulisi sisältää selittävien muuttujien kertoimien etumerkkien ja suuruusluokkien tarkastelun. Myös regressiokertoimien vakiintuneisuutta tulisi tarkastella. Vakiintuneisuudella käsitetään sitä, ovatko toisesta otoksesta saatavat regressiokertoimet todennäköisesti samaa tasoa kuin mallissa olevat. Lisäksi mallin selitysvoimaa olisi tarkasteltava käyttämällä sekä interpoloituja että extrapoloituja muuttujien arvoja (Montgomery & Peck 1992, s. 444).

Montgomeryn & Peckin (1992, s. 444) mukaan mallin toimivuutta voidaan tarkastella seuraavasti:

- Mallin kertoimia ja ennustettuja arvoja analysoidaan vertailulla aikaisempiin tutkimustuloksiin, fysikaaliseen teorianmuodostukseen tai muihin malleihin ja simulointituloksiin. Kertoimien ja ennustettujen arvojen tulisi olla realistisia ja vaikuttaa oikeansuuntaisesti tuloksiin.
- Kerätään vertailuaineisto, jolla tutkitaan mallin toimivuutta. Vertailuaineiston keruu on tehokkain tapa selvittää mallin toimivuutta.
- Alkuperäinen tutkimusaineisto jaetaan. Osa aineistosta käytetään mallien laatimiseen, osa ennusteen toimivuuden tarkasteluun. Menetelmän heikkoutena on, että mallin laatimiseen käytettävä aineisto pienenee. Jos käytettävissä on laaja aineisto, ei menetys välttämättä ole suuri.

Käsillä olevassa tutkimuksessa tarkoituksena oli kerätä sekä työntutkimuskuljettajilta että muilta kuljettajilta mallien laadinnassa käytetyn aineiston lisäksi rinnakkaisaineisto mallien toimivuuden ja yleistettävyyden testaamiseksi. Työntutkimusaineiston keruu oli kallista, ja resurssien puitteissa aineistoa oli mahdollista kerätä varsin rajallinen määrä.

Työntutkimusaineiston tuli myös jakautua eri vuodenajoille vuodenajan vaikutusten selvittämiseksi. Tämän vuoksi päädyttiinkin ratkaisuun, jossa koko työntutkimusaineisto käytettiin mallien laatimiseen. Mallien toimivuuden ja yleistettävyyden tarkasteluun jäi vain pieni jälki-inventoitu aineisto, jolla yritettiin mahdollisuuksien mukaan tarkastella mallien toimivuutta.

Puustovaurioiden ennustemallia käytettäessä kustakin käsiteltävästä rungosta on tiedettävä rungon koko ja puuston runkoluku hehtaaria kohti työalueella. Jälki-inventoiduista leimikoista ei näitä tietoja ollut saatavilla. Jälkimittauksessa todettiin ainoastaan jäävän puuston ja poistuman määrä ja keskikoko. Jälki-inventoitujen leimikoiden runkokohtaiset työolot oli pyrittävä jollakin tavoin simuloimaan, jotta ennustemallien toimivuutta voitiin kokeilla.

Kokeilun mahdollistamiseksi jouduttiin käyttämään menetelmää, johon sisältyi paljon epävarmuutta. Työntutkimusaineistosta etsittiin leimikot, joiden lähtöpuusto, jäävä puusto ja runkolukusarja olivat mahdollisimman lähellä vertailuleimikoiden työoloja. Näiden leimikoiden työoloja käytettiin kuvaamaan jälki-inventointileimikoiden työoloja. Nämä vertailuleimikot ajettiin läpi koko työntutkimusaineistoon perustuvalla puustovaurioiden ennustemallilla sekä työntutkimuskuljettajien vertailuleimikot myös heidän omilla malleillaan.

Taulukossa 51 esitetään puustovaurioiden ennustemallilla sekä kuljettajakohtaisilla malleilla lasketut vauriopuiden määrät ja osuudet sekä jälki-inventoinnissa todetut vauriomäärät vertailuleimikoissa.

Taulukko 51. Jälki-inventoinnin, koko työntutkimusaineiston mallin ja työntutkimuskuljettajien omien mallien antamat vauriomäärät vertailuleimikoissa. Suluissa leimikoiden määrä. Työntutkimuskuljettajat A - D. Vertailukuljettajat E ja F.

Kuljettaja	Jälki-inventointi		Koko aineiston malli		Kuljettajakohtainen malli	
			Vauriopuita			
	kpl/ha	%	kpl/ha	%	kpl/ha	%
A (2)	26,8	3,3	17,0	2,7	19,0	3,0
B (1)	30,3	4,4	11,2	1,5	15,3	2,0
C (1)	46,3	8,7	9,7	1,6	22,2	3,7
D (1)	4,4	0,7	14,9	2,2	9,8	1,4
E (3)	39,4	7,1	19,2	3,5		
F (1)	109,4	18,3	8,8	1,6		

Kuljettajilla A ja D vauriomäärien ennustaminen omilla malleilla onnistui verraten hyvin. Sen sijaan esimerkiksi kuljettajalla C sekä koko aineiston että oma ennustemalli aliarvioivat karkeasti vaurioiden määrän. Kuljettajilla, joilla keskimääräinen puustovaurioiden määrä on suuri, myös leimikoittainen vaihtelu on suurta. Tällöin ainoastaan riittävällä vertailuaineistolla voitaisiin tehdä päätelmiä mallin toimivuudesta. Kahdella muulla kuljettajalla koko aineiston malli aliarvioi vaurioiden määrän. Tämä on luonnollista, koska näiden kuljettajien vauriotasot olivat työntutkimusleimikoiden keskimääräistä tasoa selvästi korkeammat.

Mallin toimivuutta tutkittiin myös työntutkimusaineistossa, jonka pohjalta osamallit oli laadittu. Koko aineisto ja kuljettajakohtaiset aineistot ajettiin kolmeen kertaan läpi koko aineiston mallilla ja kunkin kuljettajan aineistot heidän omilla malleillaan (taulukko 52). Käytetty menettely kuvaa ainoastaan mallien ennustevoimaa mallien pohjana olevassa aineistossa. Koko aineiston mallin kokeilu kuljettajakohtaisiin aineistoihin on sikäli perusteltavissa, että koko aineiston mallissa valtaosa mallin perustasta tulee muilta kuin kyseiseltä kuljettajalta.

Koko aineiston mallilla samoin kuin kuljettajakohtaisilla malleilla lasketut kosketus- ja vauriomäärät olivat suhteellisen lähellä työntutkimuksessa todettuja. Sen sijaan koko aineiston malli kuljettajakohtaisesti käytettynä joko yli- tai aliarvioi kosketus- ja vauriomäärät riippuen siitä, olivatko kyseisen kuljettajan vauriomäärät keskimääräistä alhaisempia tai korkeampia.

Taulukko 52. Todelliset ja koko aineiston mallilla sekä kuljettajakohtaisilla malleilla kolmella laskentakerralla saatujen vauriomäärien vaihteluvälit työntutkimusaineistossa.

Kuljettaja	Työntutkimus		Koko aineiston malli		Kuljettajakohtaiset mallit	
	Koske-tuksia	Vaurio-puita	Koske-tuksia	Vaurio-puita	Koske-tuksia	Vaurio-puita
A	278	45	300 - 362	50 - 69	273 - 299	39 - 58
B	815	181	644 - 658	109 - 125	798 - 857	128 -145
C	123	38	84 - 104	14 - 21	107 - 136	15 - 24
D	483	41	584 - 636	85 - 114	470 - 481	65 - 79
Koko aineisto	1699	304	1639 -1698	269 - 298		

Tarkasteltaessa mallien toimivuutta ja yleistettävyyttä voidaan todeta, että kosketusmalleissa kuljettajien välinen vaihtelu on suuri, ja yleistettävien kosketusmallien laatiminen vaatisi aineistoa laajalta kuljettajajoukolta. Tällöinkin mallien toimivuus yksittäisen kuljettajan kohdalla saattaisi olla huono. Lisäksi on muistettava, että käsillä olevassa tutkimuksessa joukko tekijöitä vakioitiin, eikä esimerkiksi maaston vaikutusta pystytty tämän vuoksi ennustamaan. Työntutkimusaineistossa todetut vauriomäärät olivat lähellä laaja-aineistoisissa inventoinneissa todettua keskimääräistä tasoa, joten siinä mielessä kosketusmalleja voidaan pitää edustavina.

Kosketusten seurausmallien yleistettävyys on kosketusmalleja parempi. Esimerkiksi todennäköisyys vaurion synnylle kosketuksesta kesäaikana oli kosketuksen seurausmallien mukaan yli 1,5-kertainen muihin vuodenaikoihin verrattuna. Wästerlund (1986b, s. 67 - 71) totesi vastaavasti kuoren irrottamiseen tarvittavan syksyllä ja talvella yli 1,5-kertaisen voiman kesäaikaan verrattuna.

8 Tulosten tarkastelu

8.1 Tutkimusmenetelmä ja -aineisto

Tutkimuksessa käytetty hakkuukonetyön tutkimusmenetelmä toimi hyvin. Kolme työntutkijaa pystyi hoitamaan konetyön tapahtuma-aikaisen työntutkimuksen. Samat henkilöt huolehtivat samoista tehtävistä koko aineiston keruun ajan. Tämä oli välttämätöntä, koska monet luokittelut riippuivat

havainnoijasta. Hakkuukonetyö on nopeatahtista, eikä mittauksia olisi voitu hoitaa pienemmällä ryhmällä.

Tutkimuksessa puukohtaisten työolojen määrittämiseen käytettiin menetelmää, josta työtilan ja työalueella olevien puiden määrä arvioimalla saatiin puiden määrä/ha työalueella. Tämä tieto osoittautui käyttökelpoiseksi sekä runkokohtaista tehoajanmenekkiä että pystypuihin syntyviä kosketuksia selitettäessä.

Työntutkimuksessa runkoon kohdistuneet kosketukset havaittiin hyvin. Juurenniskaan kohdistuvien kosketusten havaitseminen oli sen sijaan vaikeaa. Työntutkimus aliarvioikin juurenniskavaurioiden määrän lumettomana aikana. Konetyön tuottavuutta koskeviin malleihin olisi saatu lisää tarkkuutta, jos muitakin runkokohtaisia tunnuksia kuin puulaji ja rinnankorkeusläpimitta olisi havainnoitu. Lisätietojen keruu olisi kuitenkin vienyt huomiota tutkimuksen päätarkoitukselta, korjuujäljen ja mahdollisten korjuujäljen ja työn tuottavuuden suhteiden selvittämiseltä.

Resurssien rajallisuuden vuoksi työn tuottavuuteen ja korjuujälkeen vaikuttavia tekijöitä vakioitiin. Esimerkiksi maaston vaikutuksesta korjuujälkeen ei tämän vuoksi saatu tuloksia. Valtaosa käytännön työmaista on kuitenkin helpohkoissa maastokohteissa, jollaisia tämänkin tutkimuksen tutkimusleimikot edustivat.

Tutkimuksessa käytetty jälki-inventointimenetelmä osoittautui toimivaksi. Eri etäisyydellä urasta sijaitseviin vyöhykkeisiin jaettu suorakaiteen muotoinen koeala antoi kuvan jäävän puuston ja poistuman rakenteesta ja jakautumisesta leimikolla. Mittaustapa on verraten työläs, eikä se työmääränsä takia ole paras mahdollinen laajamittaisiin korjuujälki-inventointeihin. Toisaalta voidaan myös kysyä, voitaisiinko metsätyöntutkimuksessa usein selvitä pienemmällä aineistolla ja kokonaiskustannuksilla, jos mittaustekniikkaan ja mittaustarkkuuteen kiinnitettäisiin nykyistä enemmän huomiota.

Työntutkimusaineisto oli kokonaisuutena riittävä, mutta yhdestä kuljettajasta aineisto jäi varsin pieneksi. Tämä oli harmillista, sillä kyseisen kuljettajan korjuujälki oli selvästi keskimääräistä huonompi. Alkuperäisenä tarkoituksena oli kerätä rinnakkaisaineisto mallien toimivuuden testaamiseksi. Kustannussyistä rinnakkaisaineiston keruu ei ollut mahdollista. Mallien toimivuuden testausta varten inventoitiin työntutkimuskuljettajilta ja kahdelta muulta kuljettajalta jälkikäteen joitakin leimikoita. Työntutkimusaineistosta etsittiin järeydeltään, lähtöpuustoltaan ja jäävältä puustoltaan mahdollisimman lähellä näitä vertailuleimikoita olleet leimikot, joita käytettiin laskettaessa puustovaurioennusteet vertailuleimikoille. Vaikka työntutkimusaineistosta löytyikin leimikoita, jotka puustotiedoiltaan olivat lähellä vertailuleimikoita, mallien testaustapaan sisältyi paljon epävarmuustekijöitä.

8.2 Työn tuottavuus ja siihen vaikuttavat tekijät

Työn tuottavuuden ja siihen vaikuttavien tekijöiden selvittämisellä haluttiin kuvata tutkimuskuljettajia. Samalla selvitettiin korjuujälkeen vaikuttavien tekijöiden vaikutusta työn tuottavuuteen. Työvaiheiden ajanmenekkejä kuvattiin valemuuttujamalleilla, joista on nähtävissä eri tekijöiden vaikutuksen taso ja suunta selitettävään muuttujaan. Luokkamuuttujien eroja tutkittiin kovarianssianalyysilla ja sen jälkeisillä luokkamuuttujien parittaisilla vertailuilla. Kovariaattina käytettiin käsiteltävän rungon kokoa, dm^3. Joitakin asioita, kuten esimerkiksi käsittelypuolen vaikutusta runkokohtaiseen tehoaikaan, tutkittiin keskittämällä tarkastelu yhteen puulajiin.

Tutkimuksessa todettu keskimääräinen hakkuutyön tuottavuus oli 11,00 m^3/h_0 vaihdellen kuljettajittain välillä 8,76 - 16,41 m^3/h_0. Kuljettajien väliset tuottavuuserot olivat huomattavat; tutkimuskuljettajien A ja D tuottavuustasot olivat selvästi korkeammat kuin kuljettajien B ja C. Tulos korostaa pieniaineistoisten aikatutkimusten vaaratekijää, tuottavuuden vahvaa riippuvuutta kuljettajasta. Tutkittaessa konetyön tuottavuutta pieniaineistoisen aikatutkimuksen tulokset saattavat olla harhaanjohtaviakin. Tämän tutkimuksen kuljettajista kuljettajat A ja D edustivat huippuosaamista kuljettajien B ja C ollessa työtaidoiltaan ehkä hieman keskimääräistä huonompia.

Tuottavuustason riippuvuuden kuljettajasta totesivat myös Tufts & Brinker (1993, s. 29) tutkiessaan hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjua Alabamassa männikön harvennuksessa. Hakkuukonetta käyttivät sekä suomalainen että amerikkalainen kuljettaja, jolla oli vain lyhytaikainen kokemus hakkuukonetyöstä. Amerikkalaisen kuljettajan tuottavuustaso oli tällöin vajaa 90 % suomalaisen kuljettajan tasosta.

Tulosten vertailua muihin tutkimuksiin vaikeuttaa se, että tulokset vain harvoin on esitetty mallimuodossa. Esitetyistäkin malleista puuttuvat usein selitysasteet ja muut mallin sopivuutta kuvaavat tunnukset. Käsillä olevassa tutkimuksessa esitetty runkokohtainen tehoajanmenekki kuusen hakkuussa oli lähellä Rummukaisen ym. (1993, s. 21) esittämän mallin ajanmenekkitasoa, ja hieman korkeampi kuin Brunbergin ym. (1989, s. 11) esittämän mallin antama ajanmenekkitaso. Tätä taustaa vasten käsillä olevan tutkimuksen tutkimuskuljettajien voidaan kokonaisuutena työn tuottavuudeltaan katsoa edustavan keskimääräistä tasoa.

Tuloksia eri työvaiheiden ajanmenekistä ei voida mallien avulla verrata Metsätehon saamiin tuloksiin, mutta niitä voidaan verrata Metsätehon esittämiin kuviin rungon koon vaikutuksesta eri työvaiheiden ajanmenekkiin, ja toisaalta voidaan verrata työajan jakautumista työvaiheisiin.

Tutkimuksessa esitetyt siirtymisajat, cmin/runko poistettavien puiden tiheyden suhteen olivat hieman pienemmät kuin Kuitto ym. (1994) ovat todenneet. Ero johtunee mittaustavasta, sillä käsillä olevassa tutkimuksessa alle 2 m:n siirtymisiä ei otettu huomioon. Hakkuulaitteen vienti ja puun kaato -työvaiheen ajanmenekkiä tämän tutkimuksen ja Kuiton ym. (1994) tulokset olivat samansuuntaisia. Karsinnan ja katkonnan ajanmenekki vaihteli tässä tutkimuksessa kuljettajittain melkoisesti, mutta oli kuljettajilla A ja D lähellä Kuiton ym. (1994) kuusen hakkuussa toteamaa tasoa.

Tutkimuksessa selvitettiin puun ottoetäisyyden ja käsittelypaikan vaikutusta hakkuutyön ajanmenekkiin. Ottoetäisyyden kasvu lisäsi runkokohtaista ajanmenekkiä jonkin verran. Urapuiden käsittely oli nopeampaa kuin viistosti sivulta tai kohtisuoraan sivulta otettujen puiden käsittely. Ottoetäisyys ja ottokulma selittivät runkokohtaista tehoajanmenekkiä myös Tuftsin (1997, s. 42) ja Ryynäsen (1994, s. 38 - 40) tutkimuksissa.

Puun käsittelypaikka vaikuttaa uralle saatavan havutuksen määrään. Havutuksen on puolestaan todettu vähentävän juuristo- ja maaperävaurioita. Viistosti tai kohtisuoraan sivulta otetuilla puilla tuonti uran yli lisäsi tehoajanmenekkiä, muttei kovin merkittävästi. Kohtuullinen määrä runkoja voidaan tuoda käsiteltäväksi uran päällä ilman merkittävää ajanmenekkilisää. Tällöin uralle saadaan havumatto suojaamaan maaperää ja juurenniskoja.

8.3 Liiketyön määrä ja siihen vaikuttavat tekijät

Liiketyön merkitys heijastuu lähes kaikessa konetyössä. Ruotsissa pieniä, metsäkuljetusurien välissä kulkevia hakkuukoneita on käytetty huomattavasti enemmän kuin Suomessa. Niiden käytön ongelmana on ollut tuottavuuden voimakas riippuvuus maasto-oloista. Rajoitetun ulottuvuutensa vuoksi pienet koneet joutuvat liikkumaan paljon leimikolla, jolloin työolojen vaikeutuminen alentaa voimakkaasti tuottavuutta. Suuren ajoajan osuuden käsiteltyä runkoa kohti pienillä metsäkuljetusurien välillä toimivilla koneilla ovat todenneet mm. Brunberg & Nilsson (1988, s. 2) ja Brunberg (1991, s. 16). Toisaalla liiketyö näkyy esimerkiksi metsäkuljetuksen aiheuttamissa maaperävaurioissa raiteenmuodostuksen ollessa sidoksissa paitsi ylikuljetettuun puumäärään myös kulkukertojen lukumäärään. Tällöin pieni ajoneuvo, tai huonoissa kantavuus-oloissa täysi kuorma, eivät saata olla parhaita vaihtoehtoja raiteen-muodostuksen kannalta. Raiteenmuodostuksen, konetyyppien, ajokertojen ja kuljetettujen puumäärien yhteyksiä on tutkittu useilla järjestetyillä kokeilla (Hallonborg 1983, Högnäs 1985, Sirén ym. 1987, Karlsson & Myhrman 1990a, 1990b).

Liiketyötä tutkittiin työolojen, liiketyön määrän, työn tuottavuuden ja korjuujäljen välisten yhteyksien selvittämiseksi. Tutkimuksessa liiketyöksi

rekisteröitiin peruskoneen ja hakkuulaitteen liikkeet. Käsiteltävä puu liikkuu keskimäärin pidemmän matkan kuin hakkuulaite, mutta puun liikettä ei tutkimuksessa rekisteröity. Puun liikkumat matkat ovat kuitenkin sidoksissa puun pituuteen.

Tehollisen liiketyön määrät poikkesivat kaikilla kuljettajilla tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Alhaisin liiketyön määrä runkoa kohti oli kuljettajalla D, toisella korkean tuottavuustason omaavista kuljettajista. Myös kuljettaja C:llä liiketyön määrä runkoa kohti oli verraten alhainen. Kuljettaja C:n tulosta selittää harvennusvoimakkuus eri etäisyyksillä urista; kuljettaja C harvensi voimakkaasti uran reunavyöhykkeitä poistuman osuuden laskiessa selvästi kauempana urasta. Poistuman painottuminen hakkuukoneen edullisimmalle työalueelle parantaa tuottavuutta ja vähentää liiketyön määrää, mutta ei ole metsänhoidollisesti hyväksyttävissä.

Kuljettaja D:n työtä leimasivat korkea tuottavuus ja suhteellisen tasainen harvennusjälki eri etäisyyksillä urasta. Syy alhaisiin runkokohtaisiin liikemääriin selittyi työtavalla ja varmalla nosturityöskentelyllä. Tutkittaessa puun käsittelypaikan vaikutusta tehollisen liiketyön määrään runkoa kohti todettiin puun tuonnin uran yli lisäävän liikemääriä. Kuljettaja D:n työtapa poikkesi puun käsittelypuolen osalta muista kuljettajista, sillä hän käsitteli viistosti sivulta tai kohtisuoraan sivulta otetuista puista yli 80 % puun sijaintipuolella uraan nähden. Muut kuljettajat toivat suunnilleen puolet näistä puista uran yli. Oleellinen liikemäärään vaikuttava seikka on myös kuljettajan ammattitaito ja kyky suunnitella työtä. Jos hän osaa työpisteelle saapuessaan hahmottaa selkeästi tilanteen ja kasojen paikat, paljon turhaa siirtelyä jää pois.

Kuljettaja A:lla liikemäärät olivat suurempia kuin kuljettaja D:llä, mutta tuottavuus ja korjuujälki samaa korkeaa tasoa. Kuljettaja A:n työtapa oli erittäin nopeatahtinen, mutta nosturityöskentely ja työn suunnittelu ripeästä työtavasta huolimatta hallittua ja varmaa.

Konetyön liikemääriä on tutkittu varsin vähän. Blomqvist ym. (1984) tutkivat liiketyön määrän vaikutusta puustovaurioihin. Vertailtavina olivat pieni kuormatraktori varustettuna lyhytulotteisella kuormaimella (uraväli 19,0 m), suuri kuormatraktoria varustettuna pitkäulotteisella kuormaimella (uraväli 35,5 m), ja pieni kuormatraktori varustettuna lyhytulotteisella kuormaimella ja vintturilla (uraväli 65,5 m). Kahdella harvennustyömaalla mitattiin kuljetustyön määrää tonnikilometreinä/ha ja liiketyön määrinä m/ha jaettuna peruskoneelle, kuormaimelle ja vintturille. Samalla selvitettiin puustovaurioiden määrä.

Blomqvistin ym. (1984, s. 10 - 11) mukaan kuljetustyön määrä (tonnia x m/ha x korjattu m^3) oli pienin lyhytulotteisella kuormaimella varustetulla pienellä kuormatraktorilla ja suurin käytettäessä pientä kuormatraktoria, lyhytulotteista

kuormainta ja vintturia. Liiketyön määrä (m/ha x korjattu m^3) oli pienin lyhytulotteisella kuormaimella varustetulla pienellä kuormatraktorilla ja suurin pitkäulotteisella kuormaimella varustetulla suurella kuormatraktorilla. Vähiten vaurioita syntyi pientä kuormatraktoria ja eniten vintturia käytettäessä. Vauriomäärä lisääntyi kuljetustyön ja liiketyön määrien kasvaessa, mutta kuitenkin hitaammin kuin kuljetus- ja liiketyön määrät.

Liiketyön teoriaa sivusi myös Imposen & Sirénin (1983) tutkimus kaatotavan vaikutuksesta yksioteprosessorin työn tuottavuuteen. Järjestetyssä kokeessa puut kaadettiin yksioteprosessorille kolmella eri tavalla ja verrattiin kaatotavan vaikutusta tuottavuuteen ja korjuujälkeen. Kaatotavan vaikutus tuottavuuteen oli vähäinen, vaikka puiden siirtelyn tarve ja näin myös liiketyön määrä poikkesivat kaatotavoittain.

Sirén (1990, s. 19) selvitti liiketyön määrää vertaillessaan pieniä hakkuukoneita kuusikon ensiharvennuksessa. Liikemääriin (m/runko ja m/valmistettu m^3) sisällytettiin koneen siirtymiset sekä hakkuulaitteen liikkeet puita ja hakkuutähteitä käsiteltäessä. Konetyypeittäin liikemäärät olivat seuraavat:

Konetyyppi	Liikemäärä	
	m/runko	m/valmistettu m^3
Yksiotehakkuukone	10,0	159,6
Kaksiotehakkuukone	10,5	179,5

Konetyyppien liikemäärien erot johtuivat yksiotehakkuukoneen mahdollisuudesta valita puun käsittelypaikka vapaasti. Erot konetyyppien välillä olisivat olleet vieläkin suuremmat, mutta yksiotehakkuukoneen kuljettaja käsitteli mahdollisimman paljon runkoja uran päällä saadakseen suojaa ajoalustalle. Rungon keskikoko Sirénin (1990) tutkimuksessa oli 60 dm^3. Vastaavalla rungon koolla tehollisen liiketyön määräksi käsillä olevassa tutkimuksessa saatiin 10,3 m/runko ja 172,4 m/valmistettu m^3. Tehollisen liiketyön määrät eivät käsillä olevassa tutkimuksessa sisällä siirtymisiä eivätkä hakkuutähteiden järjestelyä.

Sirénin (1990) tutkimuksessa keskimääräinen uraväli tutkimuspalstoittain oli vain 12,5 m - 14,9 m, ja tutkimuskoneiden nosturien ulottuvuudet 7,0 m ja 7,5 m. Ottoetäisyyden rajoittuminen 7,5 m:iin on todennäköinen syy käsillä olevassa tutkimuksessa todettuja hieman alhaisempiin liikemääriin Sirénin (1990) tutkimuksessa.

Tutkiessaan hakkuukone-kuormatraktori korjuuketjua Oregonissa Bettinger & Kellogg (1993) totesivat tavaralajimenetelmässä korkeita, kuitenkin runkojuontomenetelmiä alempia vauriomääriä. Tutkijat arvelivat puustovaurioiden suuren määrän johtuvan siitä, että tavaralajimenetelmässä liikutellaan ja käsitellään puuta runsaasti, siis liiketyön määrä on suuri. Erilaisia

runkojuontomenetelmiä alempien puustovauriomäärien Bettinger & Kellogg (1993, s. 64) arvelivat tavaralajimenetelmää käytettäessä johtuvan siitä, että hakkuukone ja kuormatraktori pystyvät liikuttelemaan puita ja pölkkyjä varsin kontrolloidusti.

Yksiotehakkuukoneen työtekniikka on joustava, koska puuta voidaan esimerkiksi karsia ja siirtää samanaikaisesti. Tämän vuoksi liiketyön määrien erot kuljettajien välillä eivät välttämättä näy tuottavuuseroina. Liiketyön määrien vertailu soveltunee paremmin eri korjuu- tai työmenetelmien analysointiin kuin käsillä olevaan tutkimukseen, jossa tutkittiin ajouralta toimivaa yhtä hakkuukonemallia. Esimerkiksi vertailtaessa ajourilta toimivaa hakkuukonetta ja pientä, myös metsäkuljetusurien välissä liikkuvaa hakkuukonetta ja näiden jälkeistä metsäkuljetusta erilaisin uravälivaihtoehdoin, liiketyön määrien vertailu saattaisi antaa mielenkiintoista tietoa. Tällöin saatettaisiin myös löytää yhteyksiä liiketyön määrien, korjuujäljen kuin myös tuottavuuden välillä.

8.4 Kosketukset ja niistä syntyneet puustovauriot

Tutkimuksella etsittiin tietoa vaurioiden synnystä, syntyherkkyyteen vaikuttavista tekijöistä ja vaurioiden aiheuttajista. Jälkikäteen tehtävään puustovaurioiden inventointiin verrattuna tutkimusmenetelmällä oli useita etuja, joskin myös heikkoutensa. Osa kosketuksista puihin jäi työntutkimuksessa huomaamatta; varsinkin juurenniskavaurioiden havaitseminen lumettomana aikana oli puutteellista. Kosketuksen syiden arviointi oli tapahtumahetkelläkin vaikea ja subjektiivinen tehtävä.

Kosketusten määrä riippui työn tuottavuuden tavoin ratkaisevasti kuljettajasta. Tuottavuuden ja kosketusten määrän välillä vallitsi tutkimusaineistossa mielenkiintoinen ja selkeä yhteys; korkean tuottavuustason kuljettajilla jäävään puustoon syntyviä kosketuksia tapahtui huomattavasti vähemmän kuin alemman tuottavuustason kuljettajilla. Tulos ei ole yllätys hakkuukonetyötä seuranneille, vaikka "suuri yleisö" saattaakin mieltää yhteen korkean tuottavuuden ja huonon korjuujäljen. Hakkuukonetyön ydin on paljolti nosturityöskentely. Nosturityöskentelyn osuus hakkuukoneen tehoajanmenekistä on lähes 40 % (Rieppo 1991, s. 16 - 19). Jouhea nosturinkäsittely mahdollistaa korkean tuottavuuden ja hyvän korjuujäljen.

Kuljettajan vaikutusta tarkasteltaessa ei kuitenkaan ole syytä automaattisesti yhdistää korkeaa tuottavuutta ja hyvää korjuujälkeä, vaikka tutkimusaineisto tällaisen tuloksen antoikin. Tutkimuskuljettajia oli vain neljä, joista yhden aineisto jäi puutteelliseksi. Vaikka sekä korkean tuottavuuden että hyvän korjuujäljen edellytyksenä on hyvä työkoneen hallinta, korjuujälki on myös asennekysymys. Löytyy varmasti kuljettajia, joilla työn tuottavuus on verraten

alhainen mutta korjuujälki erittäin hyvä. Toisaalta huipputuotokseen pystyvä kuljettaja saattaa tehdä huonoa korjuujälkeä, jos hän ei miellä korjuujälkeä tärkeäksi. Vaarallisin yhdistelmä lienee aloitteleva kuljettaja ja kovat tuottavuuspaineet. Useimmiten tuottavuus ja hyvä korjuujälki kulkevat käsi kädessä, eivätkä ne suinkaan ole toisensa poissulkevia tekijöitä.

Kuljettaja pystyy työn suunnittelulla vähentämään puustovaurioita. Puita voidaan kaataa avattavalle uralle, jolla olevien puiden lievällä vaurioitumisella ei ole merkitystä. Osa ajouran ulkopuolisista puista kuuluu selvästi poistettavaan puujaksoon, jolloin niiden varominen on turhaa. Jos kosketuksen aiheuttama selkeä vaurio syntyy työpisteellä työskentelyn alkuvaiheessa, vauriopuu saattaa olla poistettavissa ilman tilajärjestyksen tai jäävän puuston laadun huonontumista, jos vaihtoehtoisia jätettäviä puita on vielä riittävästi.

Kuljettajat olivat poistaneet tutkimusleimikoissa yli kolmanneksen kosketuspuista. Työntutkijan arvion mukaan poistetuista kosketuspuista lähes 90 % oli poistettavissa ilman oleellista heikennystä jäävän puuston määrään, laatuun tai tilajärjestykseen. Kuljettajat poistivat yli puolet voimakkaan kosketuksen saaneista puista, joista vastaavasti yli puolet olisi kuulunut metsänhoidollisesti kasvatettavaan jaksoon. Vastaavasti lievän kosketuksen saaneista puista poistettiin runsas kolmannes.

Kosketuksista 95 % luokiteltiin voimakkuudeltaan lieviksi. Hakkuukonetyössä syntyvät kosketukset poikkeavat oleellisesti esimerkiksi kuormatraktorin pyörän ajouran reunapuihin aiheuttamista kosketuksista. Kosketuksen saaneista puista vaurioitui 28,2 %. Työntutkijan kosketusjaottelu lieviin ja voimakkaisiin kuvasi kohtuullisesti kosketuksen seurauksia; lievistä kosketuksista 72,5 %:ssa ei syntynyt vauriota, kun taas voimakkaista kosketuksista vastaava osuus oli 51,2 %.

Kesällä vaurion syntyherkkyys oli suurempi kuin muina vuodenaikoina. Tämä johtuu kuoren irtoamisherkkyydestä kesällä. Wästerlundin (1986b, s. 67 - 71) mukaan männyn ja kuusen juuren kuoren irrottamiseen tarvittava voima kesällä on 40 N/cm^2 ja vastaavasti syksyllä 60-80 N/cm^2. Vaurioiden koko oli sulan puun aikana suurempi kuin talvella puun ollessa jäässä, ja kesällä keskimäärin suurempi kuin muuna sulan puun kautena.

Yli 90 % vaurioista kohdistui runkoon. Juurenniskavauriot keskittyivät lumettomaan aikaan, ja olivat laadultaan keskimäärin pahempia kuin runkovauriot. Vuodenajan vaikutuksen vaurioiden syntyherkkyyteen ja kokoon on todennut myös Kärkkäinen (1973, s. 105 - 106), jonka tutkimuksessa kaikki vaurioiden dimensiot olivat suurempia kesällä kuin talvella.

Yli 80 % todetuista vaurioista oli pintavaurioita. Vaurioiden keskikoko oli pintavaurioilla 49,2 cm^2 ja syvävaurioilla 80,5 cm^2. Vaikka pienikokoisten ja

pinnallisten vaurioiden taloudelliset vaikutukset lahon ja kasvutappioiden aiheuttajina ovat verraten vähäiset (Olsson 1984, s. 1 - 2, Fröding 1986, s. 48, Nordberg 1987, s. 9 - 10, Kokko & Sirén 1996, s. 50 - 51), kuusikoissa pienienkään vaurioiden merkitystä ei pidä vähätellä kuusen lahonarkuuden vuoksi. Vaikka mänty ei olekaan lahonarka puulaji, puustovaurioista syntyvät korot saattavat aiheuttaa merkittäviäkin tappiota sahauksessa. Erityisen haitallisia ovat ensiharvennuksessa syntyneet vauriot (Blomqvist 1984).

Vauriot olivat muodoltaan pitkänomaisia keskimääräisen pituus-leveys suhteen ollessa 6,8. Vaurioita syntyi korkeallekin runkoihin, ja keskimääräinen korkeus juurenniskasta runkovaurioilla oli 298 cm. Vauriopuiden keskimääräinen etäisyys lähimmän uran keskeltä oli hieman alle 6 m.

Kaadettava puu aiheutti 68 % kosketuksista ja 64 % vaurioista. Kaatovaurioilta on tiheässä metsässä vaikea välttyä. Kaatovaurioiden suuri määrä korostaa suunnatun ja hallitun kaadon merkitystä; hakkuukoneessa ja sen nosturissa on oltava riittävästi voimaa ja vakautta puun hallittuun ja suunnattuun kaatoon. Puun käsittelyvaihe on toinen tärkeä vaurioiden aiheuttaja. Kesäaikana juurenniskat vaurioituvat herkästi erityisesti suuria puita käsiteltäessä. Muiden työvaiheiden osuudet kosketusten ja vaurioiden aiheuttajina olivat vähäiset. Siirtymisissä, hakkuulaitteen viennissä puulle, raivauksessa ja järjestelyissä syntyi kosketuksia varsin vähän.

Työntutkimuksen perusteella laskettiin vaurio-osuudet tutkimusleimikoittain vauriopuiden määrän ja jälki-inventoinnissa mitatun pinta-alan ja runkoluvun perusteella. Keskimääräinen vaurioprosentti oli tutkimusleimikoissa 3,4 vaihdellen välillä 0,0 - 8,6. Vauriopuita oli hehtaaria kohti keskimäärin 22,0 vaihdellen välillä 0 - 61. Keskimääräinen vaurioprosentti kuljettajalla A oli 2,2, kuljettajalla B 4,9, kuljettajalla C 6,6 ja kuljettajalla D 1,4. Tutkimuksessa todetut vauriomäärät ovat tyypillistä koneellisen hakkuun puustovauriotasoa.

Puustovaurioiden syntyä työn tapahtumahetkellä on seurattu varsin vähän. Selvittäessään metsätraktorin kuormauksessa syntyvien kosketusten ja vaurioiden määrää Nilsson (1985, s. 22 - 23) ja totesi kosketusten lisääntyvän puuston tiheyden kasvaessa. Lähes 80 % kosketuksista aiheutti kuormattava taakka. Nilssonin (1985) tutkimuksessa rekisteröitiin 195 kosketusta, joista 16 % johti vaurioitumiseen. Tutkimusaineisto kerättiin syksyllä. Käsillä olevassa tutkimuksessa syksy-kevät aineistossa vajaa 30 % kosketuksista johti vaurioon.

Sirén (1990, s. 20) seurasi käsillä olevan tutkimuksen tavoin kosketuksia ja niistä syntyviä vaurioita vertaillessaan pieniä hakkuukoneita ensiharvennuskuusikossa. Poistettavat puut oli leimattu etukäteen. Leimattuihin puihin kohdistuneita kosketuksia ei rekisteröity. Kaksiotehakkuukoneella kosketuksen sisältäneiden työsyklien osuus oli 13,8 %, yksiotehakkuukoneella vastaavasti 1,1 %.

Sirénin (1990) tutkimuksessa rekisteröidyistä 74 kosketuksesta 42 % johti vaurioon. Tutkimus tehtiin helmikuussa. Käsiteltävä puu ja kuormain olivat yleisimmät vaurion aiheuttajat. Yksiotehakkuukoneen työsykleistä vain 1,1 % sisälsi kosketuksen vastaavan osuuden käsillä olevassa tutkimuksessa oltua 20,7 %. Koska Sirénin (1990) tutkimuksessa ei rekisteröity leimapuihin osuneita kosketuksia, oikea vertailukohta käsillä olevaan tutkimukseen on kosketuspuiden määrä vähennettynä hakkuun edetessä poistettujen, metsänhoidollisesti poistettavaan jaksoon arvioitujen puiden määrällä. Tälläkin laskutavalla kosketuksen sisältäneiden työsyklien osuudeksi jäi käsillä olevassa tutkimuksessa 14,0 %.

Tutkimustulosten eroihin lienee pääsyynä rungon pieni keskikoko, 60 dm^3, Sirénin (1990) tutkimuksessa. Kun tutkimusleimikko oli tiheä kuusikko, eikä oksistoon kohdistuneita pyyhkäisyjä rekisteröity, puiden runkoihin kohdistui vähän kosketuksia. Nämä kosketukset olivatkin verraten voimakkaita, koska 42 % kosketuksista johti vaurioon vastaavan osuuden käsillä olevan tutkimuksen talviaineistossa ollessa 25,4 %.

Myös Athanassiadis (1997, s. 464) seurasi vaurioiden syntyä tapahtuma-aikaisesti. Hakkuukoneena oli maataloustraktori varustettuna yksiote-hakkuulaitteella. Kaksi kolmasosaa vaurioista syntyi puita kaadettaessa ja käsiteltäessä, vajaa viidennes hakkuulaitteen viennissä puulle siirtymisten osuuden olleessa vajaa kymmenes vaurioista. Yli 90 % vaurioista oli runkovaurioita, ja 65 % vaurioista oli pinta-alaltaan alle 50 cm^2.

Jälkikäteen tehdyissä inventoinneissa arviot vaurion aiheuttajasta ja työvaiheesta ovat arvionvaraisia. Imposen & Sirénin (1983, s. 11) tutkimuksessa yksioteprosessorin vaurioista 61 % arvioitiin hakkuulaitteen ja kolmannes käsiteltävän puun aiheuttamiksi. Frödingin (1992a, s. 39) tutkimuksessa vajaan 40 % vaurioista arvioitiin syntyneen metsäkuljetuksen tai kuormauksen aikana hakkuuvaiheen osuuden ollessa 60 %. Fröding oletti vajaan kymmenyksen hakkuuvaiheen vaurioista syntyneen kaatovaiheessa karsinnan ja katkonnan arvioidun osuuden ollessa 90 %. Frödingin (1992a) jälkikäteen tehty arvio poikkeaa käsillä olevan tutkimuksen tuloksista, jossa hakkuuvaiheen vaurioista yli 60 % syntyi puita kaadettaessa.

8.5 Jälki-inventoinnin tulokset

Hakkuun päätyttyä tehdyn jälki-inventoinnin ja työntutkimuksen tulokset puustovaurioiden määrästä olivat 11 tutkimusleimikolla lähellä toisiaan, kun taas 4 leimikolla vauriomäärät poikkesivat merkittävästi. Suurimmat poikkeamat olivat leimikoilla, missä vaurioita syntyi paljon. Työntutkimuksen

ongelmana oli juurenniskavaurioiden puutteellinen havaitseminen lumettomana aikana.

Vaurioiden laadun ja koon osalta jälki-inventoinnin ja työntutkimuksen tulokset olivat samansuuntaisia. Jälki-inventoinnissa työntutkija aliarvioi kaatovaiheen merkityksen ja yliarvioi puun käsittelyn ja hakkuulaitteen osuudet vaurioiden aiheuttajana. Jälkikäteen tehtyjen inventointien tuloksiin vaurioiden syistä ja aiheuttajista onkin syytä suhtautua varauksellisesti.

Poistuman ja jäävän puuston määrä sekä jakautuminen tutkimusleimikoilla olivat keskimäärin hyvät, mutta kuljettajakohtaista vaihtelua esiintyi. Jäävän puuston määrä vastasi metsänhoito-ohjeita (Metsänhoitosuositukset 1989, s. 35a - 35 f) kaikissa työntutkimusleimikoissa. Koko tutkimusaineistossa jäävän puuston määrä oli suhteellisen tasainen eri etäisyyksillä urista. Urat oli pääsääntöisesti avattu suhteellisen vähäpuustoisiin kohtiin. Poistuman suhteen muista erottui kuljettaja C:n harvennustulos. Hän oli harventanut voimakkaasti ajouran reunavyöhykkeitä, mitä ei voida pitää metsänhoidollisesti hyväksyttävänä. Ajouran reunavyöhykkeen puiden merkityksen ajouralta vapautuneen kasvutilan hyödyntäjänä ovat tutkimuksissaan todenneet mm. Bucht (1981) ja Isomäki (1986). Kuljettajilla A, B ja D jäävän puuston määrä oli tasainen. Kaikki kuljettajat olivat tehneet selkeästi alaharvennusta.

Mielenkiintoinen tulos oli eri vyöhykkeiltä mitatun pohjapinta-alan ja puuston määrän yhteys. Pohjapinta-ala vaihteli varsin vähän puuston määrän kuitenkin muuttuessa vyöhykkeittäin. Varsin useinhan mitataan puuston määrä jälki-inventoinneissa mittaamalla pohjapinta-aloja eri etäisyyksillä urista. Tarvittaessa tarkkaa tietoa puuston määrän jakautumisesta pohjapinta-ala ei aina ole paras mahdollinen mittari.

Raivattujen puiden määrä laski uralta poispäin siirryttäessä. Raivausta tehdään vain sen verran kuin työtilan ja näkyvyyden parantamiseksi vaaditaan. Hakkuukone onkin liian kallis kone tekemään aluspuuston raivausta. Jälki-inventoinnissa arvioitiin myös kasvamaan jätettyjen, metsänhoidollisesti poistettavien puiden määrää. Näihin luettiin ne puut, jotka olisi selvästi kuulunut poistaa harvennuksessa. Metsänhoidollisesti poistettavia puita oli keskimäärin 37 puuta/ha. Poistettaviksi arvioitujen puiden määrä kasvoi selvästi uralta poispäin mentäessä.

Ajouravälіä mitattiin kahdella tavalla; kohtisuorana etäisyytenä mittauskoealalta lähimpään ajouraan ja laskennallisena, jolloin mitattiin uraston kokonaispituus leimikolla ja leimikon pinta-alan avulla laskettiin uraväli. Mittaustapojen antamat tulokset olivat lähellä toisiaan. Keskimääräinen uraväli työntutkimusleimikoilla oli 19,8 m vaihdellen leimikoittain välillä 15,8 - 22,3 m. Ajouravälin tulisi ohjeiden mukaan (Metsänhoitosuositukset 1989) olla

vähintään 20 m, joten tutkimuksessa todettu keskimääräinen uraväli oli hieman alle minimivaatimuksen.

Keskimääräinen uraleveys (mittausmenetelmä SLU-menetelmän sovellutus) oli 4,76 m. Koska jäävän puuston keskimääräinen määrä oli verraten alhainen, ajourien leveyttä voidaan pitää siedettävänä. Tarkasteltaessa jäävän puuston ja poistuman keskiläpimittoja vyöhykkeittäin todettiin poistettujen puiden keskiläpimitan olleen ajouravyöhykkeellä vain vähän suurempi kuin kauempana urasta. Urat oli siis tutkimusleimikoilla suunnattu verraten hyvin.

Raiteen keskimääräinen syvyys oli 0,6 cm. Tutkimusleimikot sijaitsivat pääosin hyvin kantavilla mailla, mutta siitäkin huolimatta tulos on varsin myönteinen. Havutuksen määrä arvioitiin lähes puolella koealoista runsaaksi, ja havutus vähentää paitsi hakkuukoneen myös metsäkuljetuksen maastovaurioita. Hakkuukoneiden metsäkuljetuskoneisiin verrattuna vähäinen raiteenmuodostus on todettu myös järjestetyissä kokeissa (Karlsson & Myhrman 1990a, 1990b).

8.6 Vertailuleimikoiden inventointitulokset

Vertailuaineiston määrä jäi kustannussyistä aiottua pienemmäksi. Vertailuaineistoksi kerättiin vain jälki-inventointitietoja alunperin suunnitellun rinnakkaisen työntutkimusaineiston asemesta. Vertailuaineiston tuloksia voidaankin pitää ainoastaan suuntaa antavina.

Puustovaurioiden määrä työntutkimuskuljettajien vertailuleimikoissa oli samaa tasoa kuin työntutkimusleimikoissa. Kahden muun kuljettajan leimikoissa vauriomäärät olivat korkeita ja korostavat kuljettajan vaikutusta korjuujälkeen. Erityisesti toisen kuljettajan ainoan leimikon vauriopuuosuus, 18,3 %, oli huolestuttavan korkea. Kyseisen kuljettajan kanssa käytyihin keskusteluihin perustuen työntutkijat arvioivat huonon korjuujäljen olleen paljolti asennekysymys. Kuljettaja kertoi avoimesti pitävänsä korjuujälkeä merkityksettömänä.

Laadultaan vertailuaineiston vauriot olivat hieman vakavampia kuin työntutkimusaineiston vauriot syvävaurioiden osuuden ollessa 26,4 % vaurioista. Vertailuleimikot olivat talvileimikoita, ja lähes kaikki vauriot olivat runkovaurioita. Kooltaan vertailuleimikoiden vauriot vastasivat talvella korjattujen työntutkimusleimikoiden vaurioita.

Jäävän puuston määrä vastasi metsänhoito-ohjeita (Metsänhoitosuositukset 1989, s. 35a - 35 f) kaikissa työntutkimuskuljettajien vertailuleimikoissa. Alle harvennusmallien alarajan jäi puustoltaan toisen vertailukuljettajan ainoa leimikko, missä myös vauriopuiden osuus oli tutkimuksen suurin.

8.7 Korjuujäljen taloudellinen merkitys

Tutkimuksessa todetun korjuujäljen seurausvaikutuksia selvitettiin esimerkkilaskelmalla, jossa etelä-suomalainen MT-kuusikko harvennettiin kiertoaikana kahdesti MELA-mallien (Hynynen 1996) mukaan. Hakkuuvaiheen korjuujäljeksi annettiin tutkimuksessa todettu keskimääräinen korjuujälki, metsäkuljetuksen korjuujälkenä käytettiin aiemmissa suomalaisissa tutkimuksissa todettua keskimääräistä tasoa.

Kiertoajan tappioiden nykyarvoksi 3 %:n korolla saatiin 1158 mk. Ajourat olivat keskeinen tekijä seurausvaikutusten kannalta. Käsillä olevassa tutkimuksessa todetulla keskimääräisellä korjuujäljellä ajourien ja urapainumien osuus kokonaismenetyksistä oli noin 70 %. Tähän myötävaikuttivat metsänhoito-ohjeita kapeampi uraväli ja verraten leveät ajourat. Puustovaurioiden osuus kokonaistappioista oli 30 %, josta suurin osa johtui lahoutumisesta.

Verrattaessa eri tekijöiden vaikutusta esimerkkilaskelman tuloksiin todettiin uravälin ja uraleveyden suuri vaikutus. Kapeat urat vähentävät ajoura-aukon menetyksiä, mutta jos urapainumia syntyy, painumien aiheuttamat tappiot kasvavat uraleveyden pienentyessä. Tämä johtuu siitä, että kapeilla urilla suuri osuus reunapuiden juuristosta altistuu painumille.

Puustovaurioiden merkitys menetysten aiheuttajana on ajouria pienempi, mutta erityisesti kuusikoissa huomionarvoinen asia. Hakkuuvaiheen puustovauriot ovat pääosin pienikokoisia pintavaurioita, joiden seurausvaikutukset eivät ole niin vakavia kuin tyypillisten metsäkuljetusvaurioiden seuraukset. Kesäaikaisessa korjuussa yhdistyvät puustovaurioiden syntyherkkyys ja urapainumien riski. Kuusikoiden kesäaikaisia harvennuksia tulisikin välttää.

Menetysten nykyarvot saadaan näyttämään pieniltä korkeaa korkoprosenttia käyttämällä. Korkean koron käyttö ei kuitenkaan liene paikallaan metsätalouden kaltaisessa pitkäjänteisessä toiminnassa. Menetysten määrää tarkasteltaessa on muistettava, ettei laskentaohjelma ota huomioon poistuman määrän ja jakautumisen vaikutuksia. Liian voimakkaan ja urien läheisyyteen keskittyneen harvennuksen, jollaista tässäkin tutkimuksessa nähtiin, aiheuttamat menetykset saattavat olla huomattavan suuret.

8.8 Puustovaurioiden ennustaminen

Tutkimuksessa esitetyt kosketus- ja vaurioennustemallit laadittiin logistista regressiota käyttäen. Logistisen regression käyttö metsätyötieteellisessä tutkimuksessa on ollut Suomessa verraten vähäistä. Puuteknologisessa tutkimuksessa logistisia malleja on käyttänyt Uusitalo (1994, s. 30 - 43). Metsäekonomistisessa tutkimuksessa logistista regressiota on käytetty

huomattavasti enemmän. Logistisia malleja ovat esittäneet mm. Kuuluvainen ym. (1983), Ollikainen & Salonen (1986), Ovaskainen ym. (1994), Hänninen & Viitala (1994), Pesonen ym. (1995), Karppinen (1995) ja Ripatti (1996).

Kuljettaja oli tutkimusaineistossa keskeinen kosketuksen todennäköisyyteen vaikuttava tekijä. Kahden tuottavuustasoltaan hyvän kuljettajan kosketusennusteet eivät poikenneet tilastollisesti merkitsevästi toisistaan. Kahdella muulla kuljettajalla kosketusten todennäköisyys oli selvästi edellisiä suurempi. Rungon koon ja puuston tiheyden kasvaessa kosketusten todennäköisyys lisääntyi merkittävästi.

Koko työsyklin kosketusmallin lisäksi laadittiin kosketusmallit eri työvaiheille. Näistä merkitystä oli lähinnä kaatovaiheen ja puun käsittelyvaiheen malleilla, koska muissa työvaiheissa kosketukset olivat varsin satunnaisia. Puun käsittelyvaiheen kosketuksia selittäväksi tekijäksi saatiin kuljettajan ja käsiteltävän rungon koon lisäksi myös vuodenaika. Maan ollessa lumeton ja sula juurenniskat ovat alttiina kosketuksille erityisesti suuria runkoja siirrettäessä ja karsittaessa.

Kosketusten seurausmallin aineistona olivat kaikki pystyyn jääneet kosketuspuut. Kosketusten seurausten oletettiin olevan kuljettajasta riippumattomia. Työntutkijan arvioimaa kosketuksen voimakkuutta ei ehdotettu mukaan kosketuksen seurauksen selittäjäksi. Vaurion syntyä kosketuksista selittivät käsiteltävän rungon koko, dm^3, ja vuodenaika. Kesällä kosketuksista syntyi vaurio selvästi herkemmin kuin muina vuodenaikoina. Tämä johtunee kuoren irtoamisherkkyydestä nila-aikana (Wästerlund 1986b, s. 67 - 71).

Mallin testaamiseen käytetty vertailuaineisto oli riittämätön. Menetelmä, jossa vertailuleimikoiden työooloja jäljiteltiin käyttämällä työoloiltaan mahdollisen lähellä vertailuleimikoita olleita työntutkimusleimikoita, sisälsi runsaasti epävarmuustekijöitä. Puustovaurioiden taso riippui tuottavuuttakin enemmän kuljettajasta, ja vauriomäärien leimikkokohtainen vaihtelu oli suurta erityisesti niillä kuljettajilla, joilla vauriomäärät ovat suuria.

Kuljettajakohtaiset mallit toimivat kuitenkin verraten hyvin niillä kuljettajilla, joilla vauriotaso oli alhainen. Sen sijaan kahden muun kuljettajan vauriomääriä, joiden vauriotasot olivat työntutkimusaineiston keskimääräistä tasoa suuremmat, malleilla ei kyetty ennustamaan. Koko työntutkimusaineiston puitteissa puustovaurioiden ennustemalli ennusti vauriomäärät verraten hyvin.

Työntutkimusleimikoiden keskimääräinen vaurioprosentti, 4,6 % jälki-inventoinnissa, oli lähellä viime vuosien korjuujälki-inventoinneissa todettua tasoa. Täten koko aineiston mallin voidaan katsoa antavan varsin keskimääräisen puustovauriotason, jos sitä käytetään vaikkapa esimerkkilaskelmissa. Kosketusten seurausmalli puolestaan antaa selkeän kuvan vuodenajan vaikutuksesta vaurioiden syntyherkkyyteen.

Pohjois-Amerikassa logistista regressiota ovat puustovaurioiden määrän ennustamiseen käyttäneet mm. Ostrofsky ym. (1986), Cline ym. (1991), Bragg ym. (1994) ja Nichols ym. (1994). Tutkitut korjuumenetelmät ovat olleet erilaisia runko- ja kokopuumenetelmiä.

Ostrofky ym. (1986) mallittivat puuston vaurioitumista lehtipuumetsiköiden harvennuksessa Mainessa. Tutkimusleimikoilla käytettiin kaato-kasauskone - pihtijuontotraktori korjuuketjua, toisella tutkimusleimikoista myös puiden kaatoa miestyönä ja vinssausta juontourien varteen. Tutkimusleimikoiden lähtöpuusto oli yli 3000 puuta/ha, ja jäävä puusto vaihteli välillä 300 - 600 puuta/ha. Poistettavien puiden keskiläpimitta rinnankorkeudella oli 8 - 10 cm. Juontourat merkittiin 20 m tai vaihtoehtoisesti 40 m välein, osalla tutkimusaluetta juontouria ei merkitty etukäteen.

Suurin osa (52 - 70 %) vaurioista syntyi puita kaadettaessa ja kasattaessa. Vauriopuiden osuus vaihteli tutkimuspalstoittain välillä 22 - 53 %. Juontourien väli ja etukäteissuunnittelu vaikuttivat puustovaurioiden määrään. Vauriopuiden osuus oli alhaisin käytettäessä 20 m:n uraväliä ja selvästi suurempi 40 m:n uravälillä. Eniten vaurioita syntyi tutkimuspalstoilla, joilla juontouria ei merkitty eikä suunniteltu etukäteen. Tutkimusleimikoilla merkittiin kasvatettavat puut. Kasvatettavista puista jouduttiin pahimmillaan poistamaan 25 % koneiden tilantarpeen vuoksi.

Ostrofsky ym. (1986, s. 1242) selittivät yksittäisen puun vaurioitumisen todennäköisyyttä logistisilla malleilla. Molemmilla tutkimusleimikoilla vaurioitumista selittäviä tekijöitä olivat hakkuumenetelmä, puulaji ja puun etäisyys juontourasta. Näiden lisäksi vaurioitumista selittivät toisella leimikoista puun läpimitta sekä hakkuumenetelmän ja puun etäisyyden urasta yhdysvaikutus, ja toisella vastaavasti pohjapinta-ala sekä pohjapinta-alan ja puulajin yhdysvaikutus. Kaikissa hakkuumenetelmissä vähäisin vaurioitumisriski oli kooltaan pienillä mahdollisimman kaukana juontourista sijaitsevilla puilla.

Cline ym. (1991) selvittivät korjuujälkeä lehtipuumetsiköiden harvennuksessa Yhdysvaltojen koillisosassa. Tutkimusleimikoissa puut kaadettiin ja kasattiin pyöräalustaisilla kaato-kasauskoneilla ja juonnettiin pihtijuontotraktoreilla. Keskimääräinen vauriopuiden osuus tutkimusleimikoissa oli 9,6 % valtaosan vaurioista ollessa pintavaurioita.

Cline ym.(1991) käyttivät logistista regressiota puuston vaurioitumisen ennustamiseen. Toisin kuin Ostrofskyn ym. (1986) tutkimuksessa puun koko, lähtöpuuston ja jäävän puuston lukumäärä, pohjapinta-ala ja hakkuumenetelmä eivät selittäneet puustovaurioiden osuutta. Sen sijaan maaston kivisyys, korjuuaika ja maaperän laatu vaikuttivat vauriopuiden määrään. Myös puiden ennakkoleimaus lisäsi vauriopuiden osuutta (Cline ym. 1991, s. 74). Tämän

arvioitiin johtuvan siitä, etteivät leimaajat pysty riittävästi ottamaan huomioon työkoneiden toimintamahdollisuuksia.

Tutkimusleimikoissa käytettiin sekä pieniä että suuria kaato-kasauskoneita. Työkoneen koko ei vaikuttanut puustovaurioiden määrään. Suurella koneella pienetkin ohjausvirheet aiheuttavat vaurioriskin, toisaalta pieni ajoneuvo tarvitsee enemmän ajokertoja, ja tällä on taas vaikutuksensa vaurioiden määrään. Clinen ym. (1991, s. 75) mukaan puustovaurioiden määrän ratkaisevat leimikon ennakkosuunnittelu ja kuljettajan kokemus.

Nichols ym. (1994) tutkivat puuston vaurioitumista lehtipuumetsiköiden harvennuksessa Mainessa. Tutkimusleimikolla vertailtiin kaato-kasauskoneeseen ja pihtijuontokoneeseen perustuvaa korjuuketjua menetelmään, jossa puut kaadettiin miestyönä ja juonnettiin vaijerijuontotraktorilla. Molemmilla menetelmillä kokeiltiin kahta harvennusvoimakkuudeltaan erilaista käsittelyä. Tutkimusaineistoa kerättiin sekä talvella että kesällä vuodenajan vaikutusten selvittämiseksi. Täyskoneellisessa menetelmässä vauriopuiden osuus vaihteli tutkimuspalstoittain välillä 20 - 31 %, vertailumenetelmässä vastaavasti välillä 22 - 44 %. Kesäaikaisessa korjuussa vauriopuiden osuus oli kaksinkertainen verrattuna talviaikaan (Nichols ym. 1994, s. 353).

Nichols ym. (1994, s. 354) selittivät yksittäisen puun vaurioitumisen todennäköisyyttä logistisella mallilla. Vaurioitumista selittivät hakkuumenetelmä ja -käsittely, lähtöpuuston pohjapinta-ala sekä puun etäisyys juontourasta. Edellisten lisäksi vaurioitumista selittivät hakkuumenetelmän ja -käsittelyn ja puulajin, hakkuumenetelmän ja -käsittelyn ja lähtöpuuston sekä hakkuumenetelmän ja -käsittelyn ja puun etäisyyden juontourasta yhdysvaikutukset.

Bragg ym. (1994, s. 20) laativat logistisen puustovaurioiden ennustemallin, jota käytetään yhdessä hakkuutyön tuottavuutta kuvaavan simulointiohjelman kanssa. Yksittäisen puun vaurioitumisen todennäköisyyttä mallissa selittävät puulaji, rinnankorkeusläpimitta, etäisyys juontourasta, lähtöpuuston pohjapinta-ala, hakkuutapa ja korjuumenetelmä.

Simulointiohjelmassa läpikäydään metsikön jäävä puusto. Kullekin puulle lasketaan todennäköisyys, jota verrataan satunnaislukugeneraattorin antamaan lukuun. Jos satunnaisluku on pienempi tai yhtä suuri kuin vaurioitumisen todennäköisyys, luetaan puu vaurioituneeksi.

Ohjelman toimivuutta kokeiltiin köysiratajuontoleimikoiden korjuujäljen ennustamisessa. Vaurioitumismallin perustana ei käytetty inventointituloksia köysiratajuonnosta, vaan malli perustui Ostrofskyn ym. (1986) tuloksiin. Ohjelma ennusti vaurioituneiden puiden määrän verraten hyvin, mutta yliarvioi vauriopuiden osuuden jäävästä puustosta, koska tuottavuutta simuloiva ohjelma harvensi puuston todellista voimakkaammin.

Braggin ym. (1994, s. 22) mukaan korjuuvaurioiden huomioon ottaminen on välttämätöntä harvennusmenetelmiä kehitettäessä, ja heidän esittämänsä simulointiohjelma mahdollistaa tuottavuuteen ja korjuujälkeen vaikuttavien tekijöiden analyyttisen tarkastelun. Ohjelmalla voidaan tarkastella puiden vaurioitumisalttiutta ja osoittaa vaurioitumisen kannalta kriittisimmät paikat eri menetelmissä. Ohjelma soveltuu hyvin puunkorjuun suunnittelun ja koulutuksen välineeksi, vaikka se kaipaakin vielä jatkokehittelyä. Puustovauriomallin perustaksi tarvittaisiin kuitenkin lisätietoa eri tekijöiden vaikutuksesta puuston vaurioitumiseen.

Edellä esitellyt pohjois-amerikkalaiset puustovaurioita ennustavat mallit ja ohjelmat ovat osittain samantyyppisiä kuin käsillä olevassa tutkimuksessa esitetty puustovaurioiden ennustemalli. Mallien laadinnassa on käytetty tutkimusleimikoiden inventointia ennen ja jälkeen harvennuksen, ja näin muodostettu kuva puuston vaurioitumisesta. Mallit kuvaavat vaurioitumisriskiä erilaisissa runkomenetelmissä, joiden vauriokuva on toisentyyppinen kuin tavaralajimenetelmässä. Pitkiä runkoja juonnettaessa juontourien reunapuut ovat erittäin alttiita vaurioille, kun taas kauempana urasta sijaitsevien puiden vaurioitumisriski on selvästi pienempi.

Käsillä olevan tutkimusmenetelmän etuna verrattuna edellä mainittuihin pohjois-amerikkalaisiin tutkimuksiin voidaan pitää työntutkimuksen tapahtuma-aikaisuutta. Vaurioiden synnyn seuranta työn tapahtumahetkellä antaa tietoa korjuujäljen syntymekanismista ja todellista tietoa vaurioiden aiheuttajista. Molemmat lähestymistavat, sekä leimikon tarkka inventointi ennen ja jälkeen harvennuksen että työntutkimus, antavat mahdollisuuden tarkastella korjuujälkeen vaikuttavia tekijöitä mallien avulla. Molemmissa menetelmissä on perusvaikeutena korjuujäljen suuri, erityisesti kuljettajasta ja työoloista johtuva vaihtelu, jonka vuoksi luotettavien yleismallien laatiminen on vaikeaa.

8.9 Päätelmiä ja tulevaisuuden tutkimustarpeita

Käsillä olevan tutkimuksen päätavoitteena oli selvittää puustovaurioiden määrä ja syntymekanismi hakkuukonetyössä. Tarkoitukseen kehitetty työntutkimusmenetelmä osoittautui toimivaksi ja antoi uutta tietoa korjuujäljen synnystä. Työn tuottavuutta samanaikaisesti korjuujäljen kanssa tutkimalla etsittiin yhteyksiä tuottavuuden ja korjuujäljen välille. Tässä tutkimusaineistossa korkea tuottavuus ja hyvä korjuujälki kulkivat käsi kädessä, mutta tämän yhteyden ei välttämättä tarvitse pitää paikkaansa kaikkien kuljettajien kohdalla.

Kuljettaja vaikuttaa oleellisesti hakkuutyön tuottavuuteen. Käsillä olevassa tutkimuksessa tutkimuskone, hakkuulaite ja myös osa työoloista oli vakioitu, jolloin kuljettajan merkitys saatiin selvemmin esille. Kun käytännön urakointityössä kuljettajan lisäksi tuottavuuteen vaikuttavat konetyyppi, mahdollisesti konemerkki sekä työolot, on oikeudenmukaisen taksapolitiikan löytäminen

vaikeaa. On kuitenkin varsin todennäköistä, että harvennuksissa kuljettaja on rungon koon ohella keskeisin tuottavuuteen vaikuttava tekijä. Myös raivaamattoman aluspuuston työtä hidastava vaikutus on yllättävän suuri.

Muutama vuosi sitten urakkataksapolitiikassa oli hetken aikaa tilanne, jolloin työolojen merkitystä väheksyttiin eikä työolojen merkitystä otettu selkeästi huomioon urakointitaksoissa. Tällainen tilanne ei pidemmän päälle ole kenenkään edun mukainen. Ensiharvennusleimikoissa, joissa taimikonhoitotyöt on laiminlyöty, koneyrittäjä ei usein hyvälläkään työpanoksella pääse oikeudenmukaiseen ansioon, vaikka työtaksa tuntuisikin työnantajan mielestä korkealta. Jos yrittäjä kokee tällaisten leimikoiden korjuun itselleen tappiollisena, hän ei varmasti motivoidu tekemään parasta mahdollista jälkeä. Suomessa tiedettäneen hakkuukonetyön tuottavuudesta ja siihen vaikuttavista tekijöistä enemmän kuin missään muualla maailmassa. Tämän vuoksi oikeudenmukaisen taksapolitiikan löytämisen ei pitäisi olla mahdotonta.

Kun metsänhoito-ohjeita uudistettiin 1990-luvun taitteessa, muutettiin ajouravälivaatimuksia oleellisesti. Muutokset tehtiin koneellisen hakkuun ehdoilla, ja ajouravälin vähimmäisvaatimukseksi tuli 20 m. Ennen muutosta koneellisessa hakkuussa kokeiltiin 30 m:n uraväliä ja metsäkuljetusurien väliin avattavaa kapeaa hakkuu-uraa, jolta metsäkuljetusurien välisen keskikaistan puut hakattiin. Hakkuu-uralla työskentely todettiin kuitenkin huonoksi vaihtoehdoksi sekä tuottavuuden että puustovaurioiden kannalta.

Käsillä olevassa tutkimuksessa keskimääräinen ajouraväli oli hieman alle 20 m eli vähän alle vähimmäisvaatimuksen. Tätä on pidettävä huolestuttavana. On muistettava, että jos vähimmäisvaatimuksena on 20 m:n uraväli, se ei kuitenkaan saa olla tavoitteena, vaan ehdottomana alarajana. Ajouraväli ei kuitenkaan yksinään ole ratkaiseva korjuun seurausvaikutusten kannalta, vaan sitä on tarkasteltava yhdessä uraleveyden, raiteenmuodostuksen, puustovaurioiden ja jäävän puuston määrän ja jakautumisen kanssa. Ensiharvennuksiin olisi oltava tarjolla korjuuvaihtoehtoja, esimerkiksi pieniä hakkuukoneita, jotka mahdollistaisivat myös keskimääräistä pidemmän ajouravälin käytön. Toisaalta metsänomistajien olisi tajuttava ensiharvennuksen olevan ensisijaisesti metsänhoitotoimenpide, jonka hedelmät korjataan tulevaisuudessa. Tämän vuoksi ensiharvennuspuulle ei tulisi asettaa liian suuria kantorahavaatimuksia. Osa metsänomistajista on varmasti valmis tinkimään ensiharvennusten kantohinnasta, jos he vastapainoksi saavat erinomaiseen tuottokuntoon harvennetun metsän.

Tehtaiden tuoreen puun tarve ja urakoitsijoiden tasainen työllistäminen vaativat ympärivuotista puunkorjuuta. Kuusikoiden harventamista kesällä tulisi välttää, sillä kesällä puustovaurioita syntyy hakkuussa helposti. Suurimmat riskit ovat kuitenkin kesäaikaisessa metsäkuljetuksessa. Hakkuukoneen kuljettaja voi tehokkaasti vähentää metsäkuljetuksen vaurioita käsittelemällä mahdollisimman suuren osan puista uran päällä. Uralle saadaan kohtuullinen havutus

ilman merkittävää ajanmenekkilisää. Havuja ei tarvita uran keskellä, vaan metsätraktorin pyörien kulkureitillä suojaamassa juurenniskoja ja maaperää.

Tehdessään ensiharvennuskaupan metsänomistaja antaa puunostajalle suuret valtuudet ja samalla vastuun metsän tulevasta kehityksestä. Onnistunut korjuu saattaa metsän hyvään tuottokuntoon, huonosti toteutettu harvennus taas näkyy metsänomistajan kukkarossa koko kiertoajan. Tämän vuoksi huolimaton työ olisi pystyttävä estämään ennakolta. Korjuujäljen valvonta ja koulutus sekä yrittäjien motivointi oikeudenmukaisen ja hyvän työn palkitsevan taksapolitiikan kautta ovat avaimet hyvään korjuujälkeen. Aina kuitenkin sattuu tapauksia, jolloin harvennusjälki ei ole hyväksyttävää. Tällaisten tapausten varalle olisi luotava korjuujäljen tutkinta- ja korvausmenettely, jolla tappion kärsinyttä metsänomistajaa voitaisiin hyvittää. Tällainen menettely kiinnittäisi huomiota korjuujälkeen jo pelkällä olemassaololollaan.

Hakkuukoneen käyttö on taitolaji, joka vaatii sekä motorista lahjakkuutta, kykyä toimia systemaattisesti että toisaalta tietoa harvennuksen metsänhoidollisesta tavoitteesta ja merkityksestä. Korjuujäljen merkityksen syvällinen tiedostaminen on tärkeää hyvällekin kuljettajalle. Jos korjuujälki koetaan merkityksettömäksi, voi huippuluokankin kuljettaja tehdä huonoa korjuujälkeä.

Hakkuukonetyön vaativuutta tulisi korostaa myös koneenkuljettajien koulutuksessa ja valinnassa. Koneenkuljettajien koulutus on kallista, ja työn opettelu urakoitsijoiden koneilla on vielä kalliimpaa. Tämän vuoksi kuljettajaoppilaiden valinnassa olisi pystyttävä löytämään henkilöt, joilla on luontaiset edellytykset selviytyä vaativasta ja paljon omatoimisuutta vaativasta työstä. Valintakriteerejä varten olisikin selvitettävä ne fyysiset ja psyykkiset ominaisuudet, joita hyvältä kuljettajalta vaaditaan, ja luotava psykologiset testit vaadittavien ominaisuuksien mittaamiseksi. Metsätraktorin kuljettajaoppilaiden suoritustasoon vaikuttavia ominaisuuksia ovat aiemmin kartoittaneet Leskinen & Mikkonen (1981). Vastaavaa tietoa olisi saatava nyt myös hakkuukonetyöstä. Erilaisten simulaattorien käyttö koulutuksessa mahdollistaa konetyön harjoittelun ja ehkäpä myös työssä vaadittavien ominaisuuksien mittaamisen kohtuullisin kustannuksin. Simulaattoreilla kuljettajaoppilas voi myös tarkastella, miltä metsikkö näyttää hänen harvennustyönsä jäljiltä.

Käsillä olevassa tutkimuksessa joukko konetyöhön vaikuttavia tekijöitä vakioitiin. Tutkimusaineisto keskittyi helppoihin maastoihin ja vain yhteen konekokoluokkaan ja -merkkiin. Tutkimus antoi kuitenkin sellaista työn tuottavuuteen ja korjuujälkeen liittyvää tietoa, jota voidaan hyödyntää hakkuukonetyötä simuloitaessa. Simuloimalla voidaan vertailla erilaisia harvennusvaihtoehtoja, ja yhdistämällä uusi tieto jo aiemmin tehtyihin korjuujäljen taloudellisia seurausvaikutuksia kuvaaviin malleihin voidaan tarkastella erilaisten korjuuvaihtoehtojen kokonaistaloutta.

9 Seloste

Johdanto

Harvennushakkuiden koneellistamisen myötä kiinnostus korjuujälkeen on lisääntynyt. Pohjoismaissa päädyttiin aikanaan tavaralajimenetelmän käyttöön osin korjuujälkeen liittyvin perustein, ja korjuujälkikysymykset ovat avainasemassa tavaralajimenetelmän vallatessa jalansijaa mm. Pohjois-Amerikassa ja Venäjällä.

Korjuujälkeä on tutkittu paljon sekä Euroopassa että Pohjois-Amerikassa. Spinelli (1995) selvitti suhtautumista korjuujälkikysymyksiin eri Euroopan maissa. Vuosina 1991 - 1997 korjuujälkitutkimusta tehtiin 12 maassa yhteensä 31 tutkimuslaitoksessa. Puusto- ja maaperävauriot nähtiin suurimpina korjuujälkeen liittyvinä huolenaiheina. Tutustuttuaan aihepiirin tutkimustuloksiin Spinelli koki tietämyksen korjuuvaurioiden taloudellisista seurausvaikutuksista erityisen puutteelliseksi.

Korjuujäljen tutkimusta on vaivannut pinnallisuus. Tutkimus- ja mittausmenetelmiin on kiinnitetty niukasti huomiota. Tulosten vertailtavuus, yleistettävyys sekä yhteensovittaminen korjuujäljen biologisten ja taloudellisten seurausten kanssa on ollut puutteellista. Vasta viime vuosina koneellisten korjuumenetelmien vakiinnuttua on tutkimuksiinkin saatu lisää syvyyttä.

Korjuujäljen, erityisesti puustovaurioiden syntyprosessia, voidaan seurata myös työn tapahtumahetkellä. Tällöin korjuujälki kyetään yhdistämään itse hakkuutyöhön, ja kullekin työvaiheelle on mahdollista määrittää oma vaurioriskinsä ja siihen vaikuttavat tekijät. Kun korjuujäljen tutkimus yhdistetään työn ajanmenekin selvittämiseen hakkuutyötä voidaan tarkastella kokonaisuutena.

Tutkimuksen tavoitteet ja tutkimusmenetelmä

Tutkimuksen keskeiset tavoitteet olivat seuraavat:

- Selvittää puustovaurioiden määrä ja laatu sekä niihin vaikuttavat tekijät hakkuukonetyössä.
- Selvittää jäävän puuston ja poistuman määrä, laatu ja jakautuminen samoin kuin ajourien ja maaperävaurioiden määrä ja laatu.
- Analysoida työn tuottavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä sekä tuottavuuden ja korjuujäljen yhteyttä.
- Esittää menetelmä puustovaurioiden määrän ja laadun ennustamiseksi.

Tutkimusongelmien ratkaisemiseksi kerättiin kahdenlaista aineistoa. *Työntutkimuksessa* seurattiin puustovaurioiden syntyä korjuuhetkellä ja pyrittiin saamaan kuva vaurioiden synnystä ja vaurioitumiseen vaikuttavista tekijöistä. Samalla selvitettiin työn tuottavuutta ja liiketyön määriä. Liiketyöksi luettiin peruskoneen liikkeet sekä hakkuulaitteen liikkeet nosturin tyven suhteen. *Jälki-inventoinnilla* eli korjuun jälkeen toteutetulla inventoinnilla selvitettiin puuston ja poistuman määrä ja rakenne tutkimusleimikoilla sekä ajourien, puusto- ja maaperävaurioiden määrä ja laatu.

Työntutkimuksen ensisijaisena tarkoituksena oli korjuujäljen syntymekanismin analysointi. Puustovaurioiden seuranta tapahtui työn suoritushetkellä, ja puukohtaiset työolot määritettiin mahdollisimman tarkasti. Työn tuottavuutta mitattiin korjuujäljen ja tuottavuuden välisten yhteyksien löytämiseksi. Tuottavuuteen vaikuttavia puuston runkokohtaisia ominaisuuksia, kuten oksaisuutta runkotasolla, ei otettu huomioon.

Jälki-inventointia tehtiin kolmenlaisissa leimikoissa. Kaikki työntutkimusleimikot jälki-inventointiin. Työntutkimusleimikoiden lisäksi inventoitiin yhteensä viisi tutkimuskuljettajien leimikkoa, joilla työntutkimusta ei tehty. Edellisten lisäksi jälki-inventoitiin yhteensä neljä leimikkoa kahdelta muulta kuljettajalta. Vertailuleimikoita mitattiin tulosten yleistettävyyden selvittämiseksi.

Jälki-inventoinnissa suorakaiteen muotoiset koealat sijoitettiin urille 30 m tai 40 m välein leimikon koosta riippuen. Laitimmaisen uran alusta arvottiin 1 - 10 m:n matka, josta ensimmäinen koeala sijaitsi 30 m:n tai 40 m:n päässä. Koealan alkupisteestä lähtien rajattiin uralta 10 m:n matka. Tälle matkalle rajattiin merkkikepein kohtisuoraan uran kulkusuuntaa vastaan 240 m^2:n koeala, joka käsitti molemmilla puolilla uraa neljä kappaletta 10 m x 3 m vyöhykettä. Koealan rakenne ja siltä tehtävien mittausten suorituspaikat on esitetty kuvassa 9 sivulla 53.

Tutkimusaineisto

Tutkimusaineisto kerättiin vuosina 1993 - 1994. Aineistoa kerättiin neljän kuljettajan työskentelystä. Tutkimuskoneet olivat urakoitsijoiden omistamia lukuun ottamatta Jämsänkosken Metsäoppilaitoksen hakkuukonetta, jota käytti koulun opettaja. Opettajan ammattitaito kuljettajana oli kohtuullinen, mutta jatkuvan työskentelyn antamaa rutiinia hänellä ei pitkistä työskentelytauoista johtuen ollut.

Yhtä urakoitsijoiden koneista käytti omistaja, kahta muuta palkattu kuljettaja. Yhdellä kuljettajista oli vuoden kokemus hakkuukoneen käytöstä, ja hänen ammattitaitonsa oli kohtuullinen. Kaksi muuta kuljettajaa oli työskennellyt Valmet 901 -hakkuukoneilla useita vuosia, ja heidän ammattitaitonsa arvioitiin erinomaiseksi.

Joitakin työtulokseen vaikuttavia tekijöitä vakioitiin. Aineistoa kerättiin yhdestä konemerkistä (Valmet 901 varustettuna Valmet 942 -hakkuulaitteella), puutavara valmistettiin kaikilla tutkimustyömailla pitkäksi 4 - 5 m:n rangaksi tai tukiksi ja tutkimuskohteet rajattiin maastoluokkiin 1 ja 2. Leimikoiksi valittiin pääasiassa kuusivaltaisia harvennusleimikoita. Mukaan otettiin sekä 1. että 2. harvennuksia. Jäävän puuston minimimääränä pidettiin 500 runkoa/ha.

Työntutkimusaineistoa kerättiin 15 leimikolta yhteispinta-alaltaan 14,69 ha. Aineisto käsitti 8192 runkoa, yhteistilavuudeltaan 1085 m^3. Aineistosta hakattiin talvella 586 m^3, kevät-syysaikana 288 m^3 ja kesällä 211 m^3. Kuusen osuus tutkimusleimikoissa oli 70 %. Lähtöpuusto oli keskimäärin 1169 runkoa/ha ja jäävä puusto 634 runkoa/ha.

Työntutkimusleimikoiden lisäksi jälki-inventointiin tuli yhteensä 9 vertailuleimikkoa kokonaispinta-alaltaan 5,86 ha. Nämäkin leimikot olivat kuusivaltaisia. Leimikoiden lähtöpuusto oli keskimäärin 1136 runkoa/ha ja jäävä puusto 614 runkoa/ha. Tutkimusleimikoiden rakenne on esitetty liitteessä 3 sivuilla 173-175.

Työn tuottavuus ja liiketyön määrä hakkuukonetyössä

Rungon koko ja kuljettaja olivat tärkeimmät tuottavuuteen vaikuttavat tekijät. Männyn ja kuusen hakkuun ajanmenekit olivat lähellä toisiaan. Rungon koon kasvaessa männyn hakkuun ajanmenekki kasvoi nopeammin kuin kuusen. Koivulla rungon koon kasvu lisäsi ajanmenekkiä voimakkaammin kuin havupuilla.

Ajouralla olleiden puiden käsittely oli nopeampaa kuin viistosti tai kohtisuoraan uraa vastaan otettujen puiden. Viistosti ja kohtisuoraan sivulta otetuilla puilla käsittelypuoli uran suhteen ei vaikuttanut tilastollisesti merkitsevästi käsittelyaikoihin. Täten uralle saadaan maaperää suojaava havutus ilman merkittävää ajanmenekkilisää. Ottoetäisyyden kasvu samoin kuin puiden lukumäärän lisääntyminen työalueella kasvattivat runkokohtaista tehoajanmenekkiä. Runsas aluspuusto lisäsi merkittävästi hakkuutyön ajanmenekkiä.

Tutkimuksessa rekisteröitiin myös liiketyön määrä. Liiketyöksi luettiin peruskoneen ja hakkuulaitteen liikkeet, käsiteltävän puun liikkumaa matkaa ei otettu huomioon. Liiketyötä kuvattiin tehollisen liiketyön määrällä m/käsitelty runko ja m/valmistettu m^3. Tehollisen liiketyön määrää selittäviä tekijöitä olivat käsiteltävän rungon koko, ottoetäisyys, kuljettaja ja puun käsittelypuoli uran suhteen. Tuottavuuden ja liiketyön määrien välillä ei ollut selkeää yhteyttä; toisella korkean tuottavuuden omanneista tutkimuskuljettajista liiketyömäärät olivat tutkimusaineiston pienimmät, toisella vastaavasti liiketyömäärät olivat tutkimusaineiston suurimmat.

Käsiteltävän puun vienti uran yli lisäsi liiketyön määrää, mutta ei lisännyt merkittävästi ajanmenekkiä. Tämä johtunee yksiotehakkuukoneen työskentelyn joustavuudesta; puutahan voidaan samanaikaisesti karsia ja siirtää.

Kosketukset ja niistä syntyneet puustovauriot

Pystypuihin syntyviä kosketuksia seurattiin tapahtuma-aikaisesti. Kosketuksiksi luettiin puiden runkoon ja juurenniskoihin syntyneet kosketukset. Ainespuumittaa täyttämättömiin puihin samoin kuin urapuihin syntyneitä kosketuksia ei rekisteröity. Hentojen oksien aiheuttamia pyyhkäisyjä ei myöskään luettu kosketuksiksi. Kosketuksen tapahtuessa rekisteröitiin kosketuksen aiheuttaja ja syy sekä puun sijaintitietoja. Työntutkimusjakson päätyttyä kosketuspuista tutkittiin mahdolliset vauriot.

Tutkimusaineisto käsitti 8192 runkoa. Työskentelyn yhteydessä 1579 työsyklissä tapahtui kosketus pystypuuhun, lisäksi 120 työsyklissä syntyi kosketus kahteen eri puuhun. Kosketuksen aiheuttaneiden työsyklien osuus vaihteli kuljettajittain välillä 14,5 - 25,4 %. Kosketuksen saaneista puista poistettiin työskentelyn edetessä hieman yli kolmannes. Poistetuista, kosketuksen saaneista puista arvioitiin metsänhoidollisesti kasvatettaviksi hieman yli kymmenesosa.

Pystyyn jääneistä kosketuspuista oli vaurioitunut keskimäärin 28,2 %. Vaurioista 86 % oli pintavauriota. Vuodenaika vaikutti vaurioiden syntyherkkyyteen selkeästi, sillä kosketuksista johti kesällä vaurioon 34,8 %, keväällä ja syksyllä 27,4 % ja talvella vastaavasti 25,4 %. Hakkuukonetyössä syntyi keskimäärin pieniä, pitkänomaisia vaurioita. Vaurioiden keskikoko oli 54,3 cm^2 ja pituus-leveys suhde 6,8. Vaurioista kohdistui runkoon 92,4 % ja 7,6 % juurenniskaan. Vauriot syntyivät pääosin puuta kaadettaessa ja käsiteltäessä. Kaatuva puu aiheutti tutkimuksessa lähes kaksi kolmasosaa kaikista vaurioista. Työntutkimustulosten perusteella laskettiin myös vauriopuiden osuudet leimikoittain ja kuljettajittain. Keskimääräinen vauriopuiden osuus työntutkimusleimikoissa oli 3,4 % kuljettajakohtaisen keskiarvon vaihdellessa välillä 1,4 % - 6,6 %.

Jälki-inventoinnin tulokset

Jäävän puuston ja poistuman määrä ja rakenne (kuvat 19 - 23 s. 85 - 87) olivat keskimäärin hyväksyttävät paitsi yhdellä tutkimuskuljettajista, jonka tekemä harvennus keskittyi voimakkaasti uran läheisyyteen. Kaikki tutkimuskuljettajat tekivät selvästi alaharvennusta. Aluspuuston raivaus keskittyi uran läheisyyteen; aluspuustoa raivattiin vain sen verran kuin työtilan ja näkyvyyden saamiseksi on tarpeen.

Puustovaurioiden määrä ja laatu inventoitiin myös jälkikäteen. Koealoihin perustuva mittaus antoi hieman korkeammat vauriopuiden osuudet kuin

työntutkimus. Keskimääräinen vauriopuiden osuus koko aineistossa oli 4,6 % kuljettajakohtaisen keskiarvon vaihdellessa välillä 1,1 % - 9,1 %. Erityisesti sulan maan aikana korjatuissa leimikoissa osa juurenniskavaurioista jäi työntutkimuksessa huomaamatta. Tämä selittää osan työntutkimuksen ja jälkikäteen tehtävän inventoinnin eroista.

Vaurioiden laatu- ja kokojakaumat olivat lähellä toisiaan työntutkimuksessa ja jälki- inventoinnissa. Juurenniskavaurioiden osuus oli kuitenkin jälkikäteen tehdyssä inventoinnissa työntutkimuksessa todettua suurempi. Kaatuvan puun osuus vaurion aiheuttajana aliarvioitiin jälkikäteen tehtävässä inventoinnissa ja toisaalta puun käsittelyn osuus yliarvioitiin. Raja kaadon ja käsittelyn välillä on kuitenkin liukuva.

Keskimääräinen ajouraväli tutkimusleimikoissa oli 19,8 m, ajouraleveys 4,8 m ja painuman syvyys 0,6 cm. Keskimääräinen ajouraväli oli hieman alle metsänhoitosuositusten alarajan. Kun lisäksi uraleveys oli verraten suuri, voidaan ajourien määrää pitää huolestuttavan suurena. Hakkuukoneen raiteenmuodostus oli tutkimuksen mukaan vähäistä. Samansuuntaisia tuloksia hakkuukoneiden raiteenmuodostuksesta ovat saaneet myös Karlsson & Myhrman (1990a).

Tutkimuksessa kerättiin myös jälkikäteen inventoimalla vertailuaineisto, joka kuitenkin jäi määrältään riittämättömäksi. Vertailuaineistoa kerättiin sekä työntutkimuskuljettajista että kahdesta muusta kuljettajasta. Työntutkimuskuljettajien korjuujälki oli vertailuleimikoissa samaa tasoa kuin työntutkimuksessa. Kahden muun kuljettajan leimikoissa puustovaurioiden osuudet olivat työntutkimuksen keskimääräisiä vaurio-osuuksia suuremmat ja korostivat osaltaan korjuujäljen suurta kuljettaja- ja leimikkokohtaistakin vaihtelua.

Mahdollisuudet puustovaurioiden määrän ennustamiseksi

Työntutkimusaineiston perusteella laadittiin puustovaurioiden ennustemalli, joka koostuu kahdesta pääosasta, kosketusmallista ja kosketusten seurausmallista. Mallit laadittiin logistista regressiota käyttäen. Malleissa on tyypillinen logistisen regression käyttötilanne; kosketus tapahtuu tai ei tapahdu, kosketuksesta syntyy vaurio tai ei synny vauriota. Selitettävä muuttuja ei tällöin ole jatkuva eikä aineiston jakauma ole normaalijakauma vaan binomijakauma.

Koko työsykliä kuvaavassa kosketusmallissa selittäviä muuttujia olivat käsiteltävän rungon koko, dm^3, puiden lukumäärä/ha työalueella ja tutkimuskuljettaja. Kosketusmallit ja kosketuksen seurausmallit laskettiin koko työsyklille ja eri työvaiheille. Ennustemalli vaurion synnylle kosketuksesta (malli **(29)**, s. 119) oli esimerkiksi seuraava:

$$\text{logit}(p) = -1{,}50 + 0{,}002 * x_1 + 0{,}56 * v$$

missä
x_1 = käsiteltävän rungon koko, dm^3
v = valemuuttuja = 1, jos korjuuaika on kesä, muulloin 0

Käsiteltävän rungon koko ja vuodenaika selittivät vaurion syntyä kosketuksesta. Jos käsiteltävän rungon koko on 100 dm^3, logit(p)-arvoksi saadaan kesällä -0,74 ja muina vuodenaikoina -1,3.

Mallista voidaan todennäköisyys p kosketuksen synnylle ratkaista seuraavasti (Hosmer & Lemeshow 1989, s. 6)):

$$p = \frac{e^{\text{logit}(p)}}{1 + e^{\text{logit}(p)}}$$

missä e = 2,718 = ln kantaluku.

Vaurion synnyn todennäköisyydeksi kesällä saadaan 0,32, muina vuodenaikoina vastaavasti 0,21. Käsiteltävän rungon koon ollessa 200 dm^3 vastaavat todennäköisyydet ovat 0,36 ja 0,24.

Kosketusmallin ja kosketusten seurausmallin lisäksi puustovaurioiden ennustemalli sisältää kahden kosketuksen mallin, poistomallin, kahden kosketuksen ja kahden vaurion mallin sekä vaurion laatua ja sijaintia ennustavat mallit. Excel-taulukkolaskentaohjelmassa toimiva ennustemalli tarvitsee syöttötietoinaan kustakin havainnosta poistettavan rungon koon, dm^3, puiden lukumäärän työalueella, kpl/ha, sekä hakkuutyön vuodenajan. Mallin eri vaiheissa ohjelma laskee tapahtuman toteutumiselle todennäköisyyden, jota verrataan satunnaislukugeneraattorin antamaan arvoon. Vertailun tuloksesta riippuen havainto joko poistuu tai jatkaa havaintotiedostossa eteenpäin. Lopputuotteena saadaan ennusteet kosketusten määrästä, vaurioista sekä vaurioiden sijainnista ja laadusta.

Puustovaurioiden ennustemallin toimivuutta testattiin jälkikäteen inventoitujen vertailuleimikoiden sekä myös mallien laadinnassa käytetyn aineiston avulla. Alkuperäisenä tarkoituksena oli kerätä mallin testaamiseksi rinnakkaisaineisto. Tämä ei kuitenkaan rahoitussyistä ollut mahdollista. Mallin toimivuuden testaamiseen tutkimuksessa tehdyllä tavalla sisältyi paljon epävarmuustekijöitä. Puustovaurioiden ennustemalli toimi verraten hyvin ennustettaessa vauriomääriä kahden alhaisen puustovauriotason omaavan tutkimuskuljettajan työskentelyssä. Sen sijaan kahdella tutkimuskuljettajalla, joilla puusto-vaurioiden määrät olivat suuria, sekä koko aineiston että heidän kuljettaja-

kohtaiset mallinsa aliarvioivat puustovaurioiden määrän. Kuljettajilla, joilla keskimääräinen puustovaurioiden määrä on suuri, myös leimikoittainen vaihtelu on suurta. Tällöin vain riittävän suurella vertailuaineistolla voitaisiin tehdä johtopäätöksiä mallin toimivuudesta.

Koko tutkimusaineisto ajettiin läpi koko aineistoon perustuvalla mallilla ja kunkin kuljettajan aineisto sekä koko aineiston mallilla että kuljettajan omalla mallilla. Koko aineiston mallilla lasketut kosketus- ja vauriomäärät olivat lähellä työntutkimuksessa todettuja määriä koko tutkimusaineistossa samoin kuin kuljettajakohtaisten mallien antamat tulokset kunkin kuljettajan omissa aineistoissa. Sen sijaan koko aineiston malli kuljettajakohtaisesti käytettynä joko yli- tai aliarvioi kosketus- ja vauriomäärät riippuen siitä, olivatko kyseisen kuljettajan vauriomäärät keskimääräistä alhaisempia tai korkeampia.

Tulosten tarkastelu

Tutkimuksessa käytetty työntutkimusmenetelmä osoittautui toimivaksi. Juurenniskoihin kohdistuneiden kosketusten havaitseminen oli kuitenkin sulan maan aikana vaikeaa. Tämän vuoksi osa juurenniskavaurioista jäi työntutkimuksessa rekisteröimättä. Jälkikäteen tehdyssä inventoinnissa käytetty mittausmenetelmä oli verraten työläs, mutta vyöhykkeittäinen mittaus antoi luotettavaa tietoa poistuman ja jäävän puuston määrästä, laadusta ja jakautumisesta leimikolla.

Työntutkimusaineiston määrä oli kokonaisuutena riittävä, mutta yhdestä kuljettajasta aineisto jäi pieneksi. Mallien testaamisessa jouduttiin käyttämään jälkikäteen inventoituja vertailuleimikoita, joita niitäkin oli niukasti.

Tutkimuksessa todettu keskimääräinen työn tuottavuus oli lähellä pohjoismaisissa tutkimuksissa todettua tasoa. Tuottavuus vaihteli kuljettajien välillä erittäin paljon; vastaava tulos on saatu useissa muissakin tutkimuksissa. Runkokohtaista tehoajanmenekkiä selittivät kuljettaja, rungon koko, dm^3, puulaji, ottoetäisyys, puun käsittelypuoli uran suhteen sekä puiden lukumäärä/ha työalueella.

Hakkuukonetyön tuottavuuteen vaikuttavat edellä mainittujen muuttujien lisäksi vielä monet muut asiat. Käsillä olevassa tutkimuksessa tutkimuskone, hakkuulaite, puutavaran pituus ja maasto pyrittiin vakioimaan. Kun aluspuustokin vaikuttaa työn tuottavuuteen, on hakkuutyön simulointi varsin vaikeaa. Tämän tutkimuksen tulokset antoivat lisätietoa, jota voidaan hyödyntää tulevaisuudessa hakkuukonetyötä simuloitaessa.

Liiketyötä lähestyttiin tutkimuksessa Blomqvistin ym. (1984, s. 3) ja Bredbergin (1985, s. 126) esittämien ajatusten pohjalta. Liiketyön määrät

erosivat kuljettajittain merkitsevästi toisistaan. Tuottavuuden ja liiketyön määrien välillä ei kuitenkaan ollut selkeää yhteyttä. Tutkimusaineiston kahdesta korkean tuottavuustason kuljettajasta toisella liiketyön määrät olivat tutkimusaineiston pienimmät, toisella taas suurimmat. Nämä kaksi kuljettajaa poikkesivat olennaisesti työtavoiltaan. Toinen näistä kuljettajista työskenteli rauhallisesti, kuitenkin joutuisasti ja varmasti. Toisen kuljettajan työtapa oli erittäin kiivastahtinen ja joutuisa suuremmista liiketyön määristä huolimatta. Hakkuukonetyön taitolajin luonne kuvastui hyvin näiden kahden osaavan kuljettajan työskentelyssä. Heidän työskentelyssään yhdistyivät korkea tuottavuus ja hyvä korjuujälki.

Seuraamalla tapahtuma-aikaisesti pystypuihin syntyneitä kosketuksia saatiin tietoa puustovaurioiden aiheuttajista ja syistä. Tuottavuuden tavoin puustovaurioiden määrä riippui ratkaisevasti kuljettajasta. Kuljettaja pystyy työn suunnittelulla vähentämään puustovaurioiden määrää. Hän voi suunnata kaadettavan puun avattavalle uralle, tai työtilan ollessa pieni sellaisten puiden päälle, jotka hän suunnittelee hetken päästä poistavansa.

Hakkuukonetyössä syntyneet kosketukset olivat pääosin kaadettavan tai käsiteltävän puun aiheuttamia, ja ne poikkesivat voimakkuudeltaan selvästi esimerkiksi traktorin pyörän aiheuttamista kosketuksista. Vajaa kolmannes kosketuksesta johti vaurioitumiseen; kesällä vaurioiden syntyherkkyys oli selvästi muita vuodenaikoja suurempi. Tyypillinen hakkuukonetyössä syntynyt vaurio oli pienikokoinen, pitkänomainen pintavaurio.

Työntutkimuksen perusteella laskettiin myös vauriopuiden osuudet tutkimusleimikoissa. Keskimääräinen vauriopuiden osuus oli 3,4 % tutkimuskuljettajien osuuksien vaihdellessa välillä 1,4 - 6,6 %. Koko tutkimus-aineiston keskimääräinen vauriopuiden osuus oli lähellä pohjoismaisissa tutkimuksissa viime vuosina todettua tasoa.

Työntutkimusleimikoiden jälki-inventoinnissa keskityttiin selvittämään poistuman ja jäävän puuston määrää ja jakautumista. Tutkimusaineistossa jäävän puuston ja poistuman määrä, laatu ja jakautuminen olivat keskimäärin hyväksyttävät lukuun ottamatta yhden kuljettajan harvennustulosta. Tämä kuljettaja harvensi voimakkaasti uran reunavyöhykkeitä pyrkien tällä tavoin lisäämään työn tuottavuutta. Tämän tyyppinen työtapa ei kuitenkaan ole missään tapauksessa hyväksyttävä.

Ajourat oli sijoitettu oikeaoppisesti verraten vähäpuustoisiin kohtiin. Keskimääräinen ajouraväli oli kuitenkin hieman alle sallitun alarajan, ja uratkin olivat suhteellisen leveitä. Hakkuukoneen raiteenmuodostus oli tutkimus-tulosten perusteella varsin vähäistä.

Jälkikäteen inventoimalla kerätty vertailuaineisto jäi riittämättömäksi. Vertailuleimikoissa työntutkimuskuljettajien korjuujälki oli samaa luokkaa kuin työntutkimusleimikoissakin. Kahden muun kuljettajien leimikoissa puustovaurioiden määrät olivat korkeita; tutkimusaineiston korkein vaurio-puiden osuus, 18,3 %, mitattiin näistä toisen kuljettajan työmaalta. Tulos korostaa jo aiemmin todettua, korjuujäljen suurta kuljettajakohtaista vaihtelua.

Tutkimuksessa todetun korjuujäljen seurausvaikutuksia selvitettiin esimerkkilaskelmalla (Kokko & Sirén 1996), jossa MT-kuusikko harvennettiin kiertoaikana kahdesti MELA-mallien (Hynynen 1996) mukaan. Hakkuuvaiheen korjuujäljeksi annettiin tutkimuksessa todettu keskimääräinen korjuujälki; metsäkuljetuksen korjuujälkenä käytettiin aiemmissa suomalaisissa tutkimuksissa todettua keskimääräistä tasoa.

Kiertoajan tappioiden nykyarvoksi 3 %:n korolla saatiin 1158 mk ajourien ollessa keskeinen menetysten aiheuttaja. Ajourien ja ajourapainumien osuus kokonaismenetyksistä oli noin 70 %. Puustovaurioiden osuus kokonais-menetyksistä oli ajouria pienempi, mutta erityisesti kuusikoissa huomioon otettava asia. On myös muistettava, ettei seurausvaikutusten laskentaohjelma ota huomioon poistuman määrän ja jakautumisen vaikutuksia, eikä myöskään mahdollisia korjuun sekundäärituhoja.

Tutkimuksessa esitetyt kosketus- ja vaurioennustemallit laadittiin logistista regressiota käyttäen. Logististen mallien käyttö metsätyötieteellisessä tutkimuksessa on Suomessa ollut toistaiseksi vähäistä. Sen sijaan Pohjois-Amerikassa logistisia malleja on käytetty paljonkin puuston vaurioitumista ennustettaessa. Keskeisessä asemassa puustovaurioiden ennustemallissa ovat kosketusmalli ja kosketuksen seurausvaikutuksia kuvaava kosketusten seurausmalli. Koska työntutkimusaineistossa todettu keskimääräinen vauriopuiden osuus oli lähellä muissa pohjoismaisissa tutkimuksissa todettua tasoa, voidaan puustovaurioiden ennustemallin katsoa johtavan verraten keskimääräiseen vauriotasoon. Mallia voidaan käyttää esimerkiksi verrattaessa mallileimikoissa eri harvennustapojen ja -voimakkuuksien sekä vuodenajan vaikutusta puustovaurioiden määrään.

Päätelmiä

Tutkimusaineistossa korkea tuottavuus ja hyvä korjuujälki kulkivat käsi kädessä. Sekä tuottavuus että korjuujälki riippuivat ratkaisevasti kuljettajasta. Hakkuukoneen käyttö vaatii kuljettajalta paljon. Kuljettaja vastaa hakkuutyön tuottavuudesta, puuvalinnasta, mittauksesta, apteerauksesta, usein ajourien sijoittamisesta, ympäristöasioiden huomioon ottamisesta, koneen huollosta ja yhteydenpidosta moniin sidosryhmiin. Hakkuutyössä tarvittavat tiedot ja taidot poikkeavat ratkaisevasti esimerkiksi metsäkuljetuksessa tarvittavista taidoista.

Hakkuukoneen kuljettaja on paljon vartijana; kuljettaja vastaa koneyrityksen taloudesta, metsän tuottokyvyn säilyttämisestä ja on samalla puun jatkojalostuksen ensimmäinen, mutta tärkeä lenkki.

Katsottaessa tämän tutkimuksen tuloksia on helppo ymmärtää vaikeudet oikeudenmukaisen urakkataksapolitiikan löytämisessä. Esimerkiksi runsaasti aluspuustoa sisältävissä ensiharvennusleimikoissa hakkuukonetyössä on vaikeaa saavuttaa riittävää taloudellista tulosta, vaikka puutavaran valmistustaksa näyttäisi suureltakin. Jos kuljettaja tuntee tekevänsä työtä lähes tappiolla, saattaa motivaatio hyvään työjälkeen olla tiukassa.

Hakkuukonetyön vaativuus olisi otettava huomioon myös kuljettajien koulutuksessa ja opiskelijavalinnoissa. Kallis koulutuspanos olisi kohdistettava sellaisiin opiskelijoihin, joilla on henkiset ja fyysiset valmiudet selviytyä hakkuukonetyön vaatimuksista. Uudet hakkuukonesimulaattorit antavat lisämahdollisuuksia sekä opiskelijoiden valintaan että koulutukseen. Korjuujäljen valvonnan merkitystä ei voi liikaa korostaa. Korjuujäljen merkityksen tiedostaminen ja tieto valvonnan olemassaolosta on välttämätöntä hyvään korjuujälkeen pyrittäessä.

Kirjallisuus

Aedo-Ortiz, D.M., Olsen, E.D. & Kellogg, L.D. 1997. Simulating a harvester-forwarder softwood thinning: A software evaluation. Forest Products Journal 47(5):36 - 41.

Aho, P.E., Fiddler, G. & Srago, M. 1983. Logging damage in thinned young-growth true fir stands in California and recommendations for prevention. USFS Research Paper, PNW-304.

Almqvist, A. 1973. Simulering av skogsmaskiner. Summary: Simulation of logging machines. Skogsarbeten. Meddelande 9. 136 s.

Andersson, L. 1984. Inverkan av stamskador på tillväxten hos tall. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 84(5): 53 - 62.

Arvidsson, A. & Knutell, H. 1977. Mekaniserad fällning i gallring under vinterförhållanden. Skogshögsskolan, Institutionen för skogsteknik. Rapporter och Uppsatser 120. 62 s.

Asikainen, A. 1995. Discrete-event system simulation of mechanized wood-harvesting systems. Research notes 38, University of Joensuu, Faculty of forestry. 86 s.

Athanassiadis, D. 1997. Residual stand damage following cut-to-length harvesting operations with a farm tractor in two conifer stands. Silva Fennica 31(4):461 - 467.

Bass, C.M., Fridley, J.L. & Lee, F.E. 1991. Methods of interactive control and simulation of forest machinery. American Society of Agricultural Engineers, Paper no. 917507. 7 s.

Bettinger, P. & Kellogg, L.D. 1993. Residual stand damage from cut-to-length thinning of second growth timber in the Cascade Range of western Oregon. Forest Products Journal 43(11/12):59 - 64.

Björheden, R. 1986. Ny rutin för gallringsuppföljning. In: Tänk till gallringsfrågan. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat 52:71 - 76.

— & Fröding, A. 1986. Ny rutin för praktisk gallringsuppföljning. A new routine for checking the biological quality of thinning in practice. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat 48. 14 s.

Blomqvist, H. 1984. Hur tallens virkeskvalitet och värde påverkas av stamskador vid gallring. Examensarbete i virkeslära. Skogshögskolan, Institutionen för virkeslärä. 69 s.

— , Nilsson, N., & Ringagård, J. 1984. Transportarbete, transportintensitet och skador i gallring. Seminariearbete i skogsteknik. Sveriges lantbruksuniversitet. Stencil. 16 s.

Bort, U. 1994. Mechanical timber harvesting interaction of logging road density, environmental safety, thinning methods, and economical success. In: Sessions, J. & Kellogg, L. (eds.): Advanced technology in forest operations: Applied ecology in action. Department of Forest Engineering. Oregon State University. Portland/Corvallis. Oregon. USA. July 24 - 29:109 - 121.

Bragg, W., Ostrofsky, W., & Hoffman, B. 1994. Residual tree damage estimates from partial cutting simulation. Forest Products Journal 44(7/8): 19 - 22.

Bredberg, C. J. 1972.Typbestånd i förstagångsgallringar. Summary: Type stands for the first thinning. Svergies lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapporter och Uppsatser 55. 43 s.

— 1985. Technical developments for improving the silvicultural quality of thinnings. In: Gallagher, G. (ed.). The influence of spacing and selectivity in thinning on stand development, operations and economy. Proceedings of the meeting of IUFRO P.4.02.02. Dublin, Ireland. s. 122 - 129.

Brunberg, T. 1991. Underlag för produktionsnormer för beståndsgående engreppsskördare i gallring - en litteraturstudie. Summary: Productivity norms for stand-operating single-grip harvesters in thinning - a study of the literature. Skogsarbeten, Redogörelse 3. 23 s.

— , 1997. Underlag för produktionsnorm för engreppsskördare i gallring. Summary: Basic data for productivity norms for single-grip harvesters in thinning. SkogForsk. Redogörelse 8. 18 s.

— & Nilsson, N. 1988. FMG 0470 Lillebror, beståndsgående engreppsskördare för klena gallringar. Skogsarbeten, Resultat 13. 4 s.

— , Thelin, A. & Westerling, S. 1989. Underlag för prestationsnormer för engreppsskördare i gallring. Summary: Basic data for productivity standards for single-grip harvesters in thinning. Skogsarbeten, Redogörelse 3. 25 s.

Bucht, S. 1977. Vad kostar stickvägarna i tillväxt? Summary: The influence of strip roads on increment at the first thinning in Scots pine forests. Skogen 6: 218 - 222.

— . 1978. Effecten av schematiska gallringar på beståndsutvecklingen i tallskog. Skogshögskolan, Institutionen för skogsskötsel. Moniste.

— 1981. Effekten av några oliga gallringsmönster på beståndsutvecklingen i tallskog. Summary: The influence of some different thinning patterns on the development of Scots pine stands. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsskötsel. Rapport 4. 276 s.

— & Elfving, B. 1977. Gallringsreaktion och tillväxt i ett korridorgallrat bestånd. Summary: Thinning response and increment in a strip-thinned stand. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 4: 323 - 345.

Cline, M.L., Hoffman, B.F., Cyr, M. & Bragg, W. 1991. Stand damage following whole-tree partial cutting in northern forests. Northern Journal of Applied Forestry 8:72 - 76.

Dahlin, B. 1980. Slingrande stickvägar i förstagallringar. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 136. 28 s.

Dale, O. & Aamodt, H. 1994. Tiltak for å hindre terrengskader, barlegging av kjoreveier. Summary: The effect of depositing limbs in strip roads to reduce damages on the forest ground. Norsk Institutt for Skogforskning, Rapport 16. 12 s.

Diggle, P. & Knutell, H. 1979. "Kniggle" - en ny metod för skattning av stickvägsbredd. Summary: "Kniggle" - a new method for estimating strip road width. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 4. 59 s.

Eisenbart, E. 1989. Reducing the effect of soil compaction and maintaining the technical potential of the terrain by means of layering with branches. FAO/ECE/ILO Seminar on the impact of mechanization of forest operations on the soil. 11 - 15 September 1989. Louvain-la-Neuve, Belgium. 6 s.

Ekbom, O. 1928. Bidrag till kännedom om bleckningsskador på gran. Svenska Skogsvårdsföreningens Tidskrift 26:659 - 684.

Eliasson, L. 1996. A single-grip harvester simulation model. Sveriges lantbruksuniversitet. Institutionen för skogsteknik. Arbetsdokument nr 17. 17 s.

Epalts, A. 1990. The impact of mechanized thinnings on the remaining stand. In: Sirén, M. (ed.). Machine design and working methods in thinnings. Proceedings of

IUFRO P4.02.01 Conference. 17 - 22.9.1989 Hyytiälä, Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 355:11 - 21.

Eriksson, L. 1981. Stickvägar och körskador i gallringsbestånd. Resultat från Riksskogstaxeringens inventering åren 1978 - 79. Summary: Strip roads and damages caused by the machines when thinning stands. Results from the Swedish National Forestry Survey for 1978 and 1979. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 137. 44 s.

Eriksson, H. 1982. Stigvägsbreddens inverkan på tillväxten i unga granbestånd - några nya resultat från ett sameuropeisk forskningsprojekt. Summary: The effect of the width of the increment of young Norway spruce stands - some new results from a common European research project. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift 6: 47 - 56.

Ernberg, V. 1907. Skadan af bleckning å ståskog. Skogsvårdsföreningens Tidskrift 5:172 - 179.

Fridley, J.L., Garbini, J.L. & Jorgensen, J.E. 1982. Interactive simulation of forest thinning system concepts. American society of Agricultural Engineers, paper no. 82 - 1603. 16 s.

Fries, J. 1974. Thinning - why and how? Thinning in the forestry of the future. Reprint of the papers from the international conference at Elmia 1973. Skogshögskolan, Institutionen för skogsteknik, Rapporter och uppsatser 69:1 - 19.

— 1976. Körskador och produktionsförluster. Skogshögskolan. Institutionen för skogsproduktion. Rapporter och Uppsatser 40. 64 s.

Fröding, A. 1982. Hur ser våra nygallrade bestånd ut? Summary: The condition of newly thinned stands. A study of 101 randomly selected thinnings. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 144. 48 s.

— 1983a. Beståndsskador vid träddelsgallring. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Stencil nr. 212.

— 1983b. Skador och stickvägar vid delmekaniserad gallring. Summary: Status of remaining stand after partly mechanized thinning. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 152. 34 s.

— 1986. Skador - Effekter i beståndet. Tänk till i gallringsfrågan! Nya tankar kring stickvägar, skador och teknik i gallring. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat 52. s. 42 - 55.

— 1992a. Beståndsskador vid gallring. Summary: Thinning damage to coniferous stands in Sweden. Moniste. 49 s.

— 1992b. Gallringsskador - En studie av 403 bestånd i Sverige 1988. Summary: Thinning damage - A study of 403 stands in Sweden in 1988. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 193. 45 s.

Gallis, C. 1997. Stochastic computer simulation of forest biomass logistics in Greece. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 15. 139 s.

Gingras, J.F. 1994. A comparison of full-tree versus cut-to-length systems in the Manitoba Model Forest. Special Report SR-92. FERIC. Pointe Claire, Quebec, Canada. 16 s.

Goulet, D.V., Iff, R.H. & Sirois, D.L. 1979. Tree-to-mill forest harvesting simulation models: where are we? Forest Products Journal 29(10):50 - 55.

— , Iff, R.H & Sirois, D.L. 1980a. Five forest harvesting simulation models. Part 1: Modelling characteristics. Forest Products Journal 30(7):17 - 20.

— , Iff, R.H. & Sirois, D.L. 1980b. Analysis of five forest harvesting simulation models. Part 2: Paths, pitfalls and other considerations. Forest Products Journal 30(8):18 - 22.

Gullberg, T. & Johansson, J. 1992. Studier av traktorn Ford Versatile 276 med gripskördaraggregatet Tufab GS 302. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik Uppsatser och Resultat 226. 28 s.

Haarlaa, R. 1973. The effect of terrain on the output in forest transportation of timber. Seloste: Maaston vaikutus puutavaran metsäkuljetustuotokseen. Acta Forestalia Fennica 128. 43 s.

Hakkila, P. & Laiho, O. 1967. Kuusen lahoaminen kirvesleimasta. Summary: On the decay caused by axe marks in Norway spruce. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 64(3). 34 s.

Hallonborg, U. 1983. Bärighetsprov vid Hornborgasjön. Skogsarbeten, Resultat 4. 4 s.

Harstela, P. 1975. Työajan menekkiin ja työntekijän kuormittumiseen vaikuttavat tekijät eräissä metsätyömenetelmissä. Teoreettinen ja empiirinen analyysi. Summary: Factors affecting the consumption of working time and the strain on the worker in some forest work methods. A theoretical and empirical analysis. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 87. 130 s.

— & Maukonen, A. 1983. Tavanomainen ja kuormainprosessori varttuneissa harvennusmetsissä. Simulaattorikoe. Summary: A conventional and grapple loader processor in second and third thinnings. A simulator experiment. Silva Fennica 17(2):101 - 111.

Hartikainen, S. 1991. Harvennushakkuiden korjuutyön laatu ja hakkuukoneen kuljettajille tehty kysely. Metsäkeskus Tapio. Moniste.

— 1992. Korjuuvaurioselvitys 1992. Metsäkeskus Tapio. Moniste.

— 1993. Harvennushakkuiden korjuujälki. Metsäkeskus Tapio. Moniste.

— 1994. Harvennushakkuiden korjuujäljen inventointi 1994. Metsäkeskus Tapio. Moniste.

— 1995. Harvennushakkuiden korjuujäljen inventointi 1995. Metsäkeskus Tapio. Moniste.

— 1996. Harvennushakkuiden korjuujälki. Tulokset koneellisista harvennuksista 1996. Metsätalouden kehittämiskeskus Tapio. Moniste.

Harvennushakkuiden korjuujäljelle asetettavat vaatimukset sekä korjuujäljen arviointi ja mittaaminen. 1990. Metsätehon opas. Helsinki. 25 s.

Harvennushakkuiden korjuutyön laatuselvitys. 1990. Metsäkeskus Tapio. Moniste. Helsinki.

Hildebrand, E.E. & Wiebel, M. 1986. Zur Bedeutung des Bodenwassergehaltes von Feinlehmstandorten bei der Entstehung von Bodenschäden durch Befahrnung. Allgemeine Forstzeitung 41(25/26):617 - 622.

Hosmer, D.W. & Lemeshow, S. 1989. Applied logistic regression. John Wiley & Sons. New York. 309 s.

Huse, K.J. 1978. Misfargning of mikroflora i sår efter tynningsdrift i granskog. Summary: Discoloration and microflora in wounds due to thinning operation in stands of *Picea abies (L.) Karst.* Rapp. Norsk institutt for skogforskning. Avd. for skogvern, Forstpatologi. 33 s.

— 1983. Forekomst av råte i norsk skogsbruk. Summary: Frequency of butt rot in stands of *Picea abies* (L.) Karst. in Norway. Norsk institutt for skogforskning. Rapport 3. 39 s.

Hynynen, J. 1996. Puuston kehityksen ennustaminen MELA-järjestelmässä. Julkaisussa: Hynynen, J. & Ojansuu, R. (toim.). Puuston kehityksen ennustaminen - MELA ja vaihtoehtoja. Tutkimusseminaari Vantaalla 1996. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 612: 21 - 37.

Hämäläinen, J. 1973. Contribution profit analysis for fully regulated forest and its empirical application. Seloste: Normaalimetsän katetuottoanalyysi ja sen empiirinen sovellutus. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 80(1). 47 s.

Hänninen, H. & Viitala, E-J. 1994. Metsänomistuksen rakennemuutos ja metsätalouden edistämistoiminta. Julkaisussa: Ovaskainen, V. & Kuuluvainen, J. (Eds.). Yksityismetsänomistuksen rakennemuutos ja metsien käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 484:75 - 103.

Högnäs, T. 1982. Korjuujälki eräissä vuosina 1980 - 1982 toteutetuissa kasvatushakkuuleimikoissa. Tutkimusselostus 135. Metsähallituksen kehittämisjaosto. Hirvas. 63 s.

— 1985. Kuorman koon vaikutus metsätraktorin raidesyvyyteen. Koeselostus n:o 217. Metsähallituksen kehittämisjaosto. Hirvas. 19 s.

Imponen, V. & Sirén, M. 1983. Kaatotavan vaikutus kuormainprosessorin tuottavuuteen. Summary: The influence of the felling method on the performance of a grapple loader processor. Folia Forestalia 548. 14 s.

Isajev, V.I. 1970. Surface and inside soil runoff in the cutovers of the Central Ural coniferous forests. Lesovedenje 1. 69 s.

Isomäki, A. 1986. Linjakäytävän vaikutus reunapuiden kehitykseen. Summary: Effects of line corridors on the development of edge trees. Folia Forestalia 678. 30 s.

— 1994. Ajouran leveyden määritys. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 501. 66 s.

— & Kallio, T. 1974. Consequences of injury caused by timber harvesting machines on the growth and decay of spruce (Picea abies (L.) Karst). Seloste: Puunkorjuukoneiden aiheuttamien vaurioiden vaikutus kuusen lahoamiseen ja kasvuun. Acta Forestalia Fennica. Vol. 136. 25 s.

— & Niemistö P. 1990. Ajourien vaikutus puuston kasvuun Etelä-Suomen nuorissa kuusikoissa. Folia Forestalia 756. 36 s.

Kairiukstis, L. & Sakunas, Z. 1991. The impact of logging operations on the soil and forest environment. In: Post-Congress Proceedings. IUFRO Division 3. XIX World Congress. Montreal, Canada. 5-11 August, 1990. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat 221:115 - 125.

Kaivola, A. 1995. Yksiotehakkuukoneen joukkokäsittelyn simulointi. Metsäteknologian lisensiaattitutkimus maatalous- ja metsätieteiden lisensiaatin tutkintoa varten. Moniste. 83 s.

Kallio, T. 1973. Peniophora gigantea (Fr.) Massee and wounded spruce (Picea abies (L.) Karst). Seloste: Peniophora gigantea ja kuusen vauriot. Acta Forestalia Fennica 133. 28 s.

Karlsson, L. & Myhrman, D. 1990a. Spårdjupsprov, engreppsskördare. Skogsarbeten, Resultat 22. 4 s.

— & Myhrman, D. 1990b. Spårdjupsprov, skotare. Skogsarbeten, Resultat 22. 4 s.

Karppinen, H. 1995. Metsänomistajien arvot ja metsätaloudellinen toiminta. Abstract: Forest values, landowner objectives and forestry behaviour of nonindustrial forest owners. Helsingin yliopisto. Kansantaloudellisen metsäekonomian lisensiaattitutkielma. 139 s.

Kokko, P. & Sirén, M. 1996. Harvennuspuun korjuujälki, korjuujäljen seurausvaikutukset ja niiden arviointi. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 592. 70 s.

Kuitto, P.-J. & Mäkelä, M. 1988. Kuormainharvesteri ensimmäisessä ja toisessa harvennuksessa. Summary: Boom-mounted harvester in first and second thinnings. Metsätehon katsaus 7. 4 s.

— , Keskinen, S., Lindroos, J., Oijala, T., Rajamäki, J., Räsänen, T. & Terävä, J. 1994. Puutavaran koneellinen hakkuu ja metsäkuljetus. Summary: Mechanized cutting and forest haulage. Metsätehon tiedotus 410. 38 s.

Kuuluvainen, J., Loikkanen, H. A. & Salo, J. 1983. Yksityismetsänomistajien puuntarjontakäyttäytymisestä. Summary: The timber supply behaviour of the private nonindustrial forest owners in Finland. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 112. 100 s.

Kärkkäinen, M. 1969. Metsän vaurioituminen kesäaikaisessa puunkorjuussa. Summary: The amount of injuries caused by timber transportation in the summer. Acta Forstalia Fennica vol. 100. 35 s.

— 1971. Lahon leviäminen puunkorjuun aiheuttamista kuusen runko- ja juurivaurioista. Summary: Decay following logging injury in stems and roots of Norway spruce. Silva Fennica 5(3):226 - 233.

— 1973. On the properties of tree wounds due to timber transportation in thinnings. Tiivistelmä: Harvennuspuutavaran kuljetuksen aiheuttamien puustovaurioiden ominaisuuksista. Helsingin yliopiston metsäteknologian laitos. Tiedonantoja 22. 174 s.

Laasasenaho, J. 1982. Taper curve and volume functions for pine, spruce and birch. Seloste: Männyn, kuusen ja koivun runkokäyrä- ja tilavuusyhtälöt. Communicationes Instituti Forestalis Fenniae 108:1 - 74.

Lageson, H. 1996. Effects of thinning type on the harvester productivity and on the residual stand. In: Thinning from below or above. Implications on operational efficiency and residual stand. Acta Universitatis Agriculturae Sueciae. Silvestria 14. 10 s.

Laiho, O. 1983. Lahon alkuunpääsy pystypuuston vaurioista ja sen estäminen. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 94:42 - 56.

Lanford, B.J. & Stokes, B. J. 1995. Comparison of two thinning systems. Part I. Stand and site impacts. Forest Products Journal. 45(5):74 - 79.

— & Stokes, B. J. 1996. Comparison of two thinning systems. Part II. Productivity and costs. Forest Products Journal 46(11/12): 47 - 53.

Lappi, J. 1993. Metsäbiometrian menetelmiä. Silva Carelica 24:111 - 116.

Leskinen, M. & Mikkonen, E. 1981. Metsäkoneiden kuljettajille asetettavat vaatimukset. Summary: Requirements to be made of forest machine operators. Metsätehon tiedotus 369. 22 s.

Lilleberg, R. 1984. Kasvatushakkuiden korjuujälki. Summary: The state of harvested thinning stands. Metsätehon tiedotus 388. 16 s

— 1986. Harvennushakkuuleimikoiden korjuujälki kehittyneempiä menetelmiä käytettäessä. Summary: Advanced harvesting methods and damage to residual growing stock. Metsätehon katsaus 12. 4 s.

— 1990. Kuormainharvesteri avo- ja harvennushakkuissa. Maksuperustetutkimus. Metsäteho, moniste. 21 s.

— 1991. Harvennustapa ja puiden joukkokäsittely ensiharvennusmännikön koneellisessa hakkuussa. Summary: The thinning method and multi-tree handling in mechanized first thinning of pine stands. Metsätehon tiedotus 406. 11 s.

Löfgren, B. & Landström, M. 1994. Transporter i väglöst land. SkogForsk, Resultat 15. 4 s.

Makkonen, I. 1989. Choosing a wheeled shortwood forwarder. FERIC Technical Note 136. Forest Engineering Research Institute of Canada. Pointe Claire, Quebec, Canada. 12 s.

Matilainen, J. 1995. Tulevaisuuden puunkorjuukoneen suunnitteluvaatimukset. Oulun yliopisto. Prosessitekniikan osasto. Työtieteen jaos. Hanke 93314. Loppuraportti työsuojelurahastolle. 102 s.

McMahon, S. & Evanson, T. 1994. The effect of slash cover in reducing soil compaction resulting from vehicle passage. LIRO Logging Industry Research Organization Report. Vol. 19 (1). 8 s.

Mcneel, J. & Ballard, T. 1992. Site and stand impacts of harvester-forwarder thinning operations in a Douglas-fir plantation. Journal of Forest Engineering 4(1):23 - 29.

Meadows, J.S. 1993. Logging damage to residual trees following partial cutting in a green ash-sugarberry stand in the Mississippi delta. In: Gillespie, A.R., Parker, G.R., Pope, P.E. & Rink, G. (eds.). Proceedings of the 9th central hardwood forest conference. March 8-10. West Lafayette, IN. Gen. Tech. Rep. NC-161. St. Paul, MN: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, North Central Forest Experiment Station:248 - 260.

Meng, W. 1978. Baumverletzungen durch Transportvorgänge bei der Holzernte Ausmass und Verteilung, Folgeschäden am Holz und Versuch ihrer Bewertung. Schriftenreihe der Landesfortsverwaltung Baden-Würtemberg Band 53. 159 s.

Metsänhoitosuositukset 1989. Keskusmetsälautakunta Tapio. 55 s.

Metsätalous ja ympäristö 1994. Metsätalouden ympäristötyöohjelman mietintö 1994:3. Maa- ja metsätalousministeriö. 100 s.

Mikkonen, E. 1983. Eräiden matemaattisen ohjelmoinnin menetelmien käyttö puun korjuun ja kuljetuksen sekä tehdaskäsittelyn menetelmävalinnan apuvälineenä. Abstract: The usefulness of some techniques of the mathematical programming as a tool for the choise of timber harvesting system. Acta Forestalia Fennica 183. 110 s.

Moilanen, J. 1990. Korjuuvaurion vaikutus kuusen kasvuun, lahoutumiseen ja käyttöarvoon. Pro-gradu työ. Helsingin yliopiston metsänarvioimistieteen laitos. 52 s.

Montgomery, D.C. & Peck, E.A. 1992. Introduction to linear regression analysis. Second edition. A Wiley-Interscience publication. 527 s.

Mäkelä, M. 1987. Kuormainharvesterin käyttö viimeisissä harvennushakkuissa. Summary: A boom-mounted harvester in final thinnings. Metsätehon katsaus 5. 4 s.

— 1989a. Koneellinen puunkorjuu männikön ensimmäisessä harvennuksessa. Summary: Mechanical harvesting in first thinnings of pine stands. Metsätehon katsaus 2. 6 s.

— 1989b. Koneellinen puunkorjuu kuusikon ensimmäisessä harvennuksessa. Summary: Mechanical harvesting in first thinning of spruce stands. Metsätehon katsaus 10. 6 s.

— 1990a. Turvemaiden koneellinen puunkorjuu kesäaikaisissa ensiharvennuksissa. Summary: Mechanized first thinning of unfrozen peatland. Metsätehon katsaus 4. 6 s.

— 1990b. Pienet kuormainharvesterit - Farmi Trac 5000 ja Nokka-Joker - ensiharvennusten hakkuukoneina. Summary: The use of small one-grip harvesters - Farmi Trac 5000 and Nokka-Joker - for first thinning. Metsätehon katsaus 12. 4 s.

Nichols, M.T., Lemin Jr.,R.C. & Ostrofsky, W.D. 1994. The impact of two harvesting systems on residual stems in a partially cut stand of northern hardwoods. Canadian Journal of Forest Research. 24:350 - 357.

Niemistö, P. 1987. A method for evaluating the effect of strip roads on the growth and yield of coniferous stands. In: Knutell, H. (ed.). Development of thinning systems to reduce stand damage. Proceedings of the meeting of IUFRO Project group P4.02 and Subject group S1.05-05. Swedish university of agricultural sciences. Faculty of forestry. Department of operational efficiency. Research notes 98:103 - 117.

— 1988. Puunkorjuun piilokustannukset. Metsä ja puu 6:18 - 21.

— 1989. A simulation method for estimating growth losses caused by strip roads. Scandinavian Journal of Forest Research 4: 203 - 214.

— 1992. Runkolukuun perustuvat harvennusmallit. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 432. Metsäntutkimuslaitos, Muhoksen tutkimusasema. 18 s.

Nilsson, N. 1985. Skador vid kranarbete i gallring. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Stencil 25. 35 s.

Nilsson, P. O. 1965. Rötangrepp efter skador på rotsystemet i granbestånd. Skogen 20: 394.

— & Hyppel, A. 1968. Studier över rötangrepp i särskador hos gran. Sveriges Skogsförbundets tidsskrift 66:675 - 713.

Nordberg, M. 1985. Nu skall vi höja gallringskvaliteten. Skogsarbeten, Resultat 4. 4 s.

— 1987. Teoretisk modell för bedömning av trädskadors ekonomiska konsekvenser. Skogsarbeten. Stencil, 13 s.

Nordfors, G. 1923. Om efter stämpling uppkommen rötskada å gran. Skogsvårdsföreningens Tidskrift 21. s. 149 - 184.

Oijala, T., Säteri, L. & Örn, J. 1997. Puunkorjuun ja puutavaran kaukokuljetuksen kustannukset vuonna 1996. Summary: Timber harvesting and long-distance transportation costs in 1996. Metsätehon katsaus 3. 4 s.

Ollikainen, M. & Salonen, H. 1986. The selling frequency of forest owners: A sequential binary analysis. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 238. 33 s.

Olsson, M. T. 1977. Körskador i skogsbruket — ett markvårdsproblem. Sveriges Skogsvårdsförbunds Tidskrift. Häfte 2 - 3:233 - 247.

Olsson, P. 1984. Beräkning av tillväxt- och kvalitetsnedsättning orsakad av skador i gallring. Skogsarbeten, Stencil. 16 s.

Orke, J. & Scherman, S. 1986. Olika arbetsmetoder med Valmet 901/935 i gallring. Skogsarbeten, Resultat 2. 4 s.

Ostrofsky, W.D., Seymour, R.S. & Lemin, jr., R.C. 1986. Damage to northern hardwoods from thinning using whole-tree harvesting technology. Canadian Journal of Forest Research 16:1238 - 1244.

Ovaskainen, V., Hänninen, E. & Hänninen, H. 1994. Metsänhoidollinen aktiivisuus yksityistiloilla. Julkaisussa: Ovaskainen, V. & Kuuluvainen, J. (Eds.). Yksityismetsänomistuksen rakennemuutos ja metsien käyttö. Metsäntutkimuslaitoksen tiedonantoja 484:60 - 74.

Pawsey, R.G. & Gladman, R.J. 1965. Decay in standing conifers developing from extraction damage. Forestry Commission. Forest record 54:1 - 25.

Perustason maksut puutavaran metsäkuljetuksessa Etelä-Suomessa ja urakointimaksujen sopimusmenettely ajalle 1.4.1991 - 15.11.1991. Metsäalan Kuljetuksenantajat ja Koneyrittäjien liitto r.y. 53 s.

Pesonen, M., Räsänen, P. & Kettunen, A. 1995. Modelling non-industrial private forest landowners´ strategic decicion making by using logistic regression and neural networks: Case of predicting the choice of forest taxation basis. Silva Fennica 29(2):171 - 186.

Pilkerton, S.J., Han, H.-S. & Kellogg, L.D. 1996. Quantifying residual stand damage in partial harvest operations. In: Blinn, C.H.& Thompson, M.A. (eds.). Planning and implementing forest operations to achieve sustainable forest. Proceedings of papers presented at the Joint meeting of the Council of Forest Engineering and International Union of Forest Research Organisations. Marguette, Michigan, USA. July 29 - August 1, 1996:62 - 72.

Poikela, A. 1992. Selvitys harvennushakkuun korjuujälki-inventoinnin tarkkuudesta. Metsäkeskus Tapio. Raportti 9.9.1992. 12 s.

Pukkala, T. 1988. Studies of the effect of spatial distribution of trees in the diameter growth of scots pine. Joensuun yliopiston luonnontieteellisiä julkaisuja 13. 8 s.

Ranta, E., Rita, H. & Kouki, J. 1989. Biometria. Tilastotiedettä ekologeille. Yliopistopaino. Helsinki. 569 s.

Reisinger, T.W., Greene, W.D. & Mcneel, J.F. 1988. Microcomputer-based software for analyzing harvesting systems. Southern Journal of Applied Forestry, vol. 12(1):37 - 41.

Rieppo, K. 1991. Tutkimus metsäkoneiden nostureista ja niillä työskentelystä. Summary: A study concerning forest machinery loaders and working with them. Metsätehon tiedotus 405. 21 s.

Ripatti, P. 1996. Factors affecting partitioning of private forest holdings in Finland. A logit analysis. Acta Forestalia Fennica 252. 84 s.

Rita, H. & Ranta, E. 1996. Kadonnutta rakennetta etsimässä - johdatus logistisiin regressiomalleihin ja log-lineaarisiin malleihin. Käsikirjoitus.

Rummukainen, A., Alanne, H. & Mikkonen, E. 1993. Puunhankinta muutospaineessa. Voimavaratarpeiden arviointimalli vuoteen 2010. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 2. 103 s.

Ryynänen, S. 1993. Maataloustraktorin hakkuukoneet. Tutkimusprojektin (1990 - 1993) loppuraportti. Työtehoseuran monisteita 11(29). 43 s.

— 1994. Maataloustraktori männikön ensiharvennuksessa. Summary: Farm tractor harvester in first thinning of pine. Työtehoseuran julkaisuja 338. 68 s.

Saarnijoki, S. 1939. Eräitä paperipuuhakkuiden yhteydessä tehtyjä, kuusen tyvilahoa ja sen yleisyyttä koskevia havaintoja. MA 56(2):47 - 52.

Santesson, M. & Sjunnesson, S. 1972. Simulation model for thinning machines. Skogshögskolan, Institutionen för skogsteknik. Rapporter och uppsatser 49.

Sauter, U, 1995. Competing long and short wood cutting systems using harvesters for thinning conifer stands. In: Kellogg, L. & Milota, G. (eds.). The way ahead with harvesting and transportation technology. Proceedings of IUFRO P3.07 meeting. IUFRO XX world congresss. Tampere, Finland. s. 70 - 76.

Schäfer, T. & Sohns, D. 1993. Minderung der Bodenverdichtung durch eine Reisigauflage. Allgemeine Forstzeitung 48(9):452 - 455.

Schäffer. J., Hildebrand, E.E. & Mahler, G. 1991. Bodenverformung beim Befahren. Wirkung der Armierung durch Reisigmatten. Allgemeine Forstzeitung 46(11):550 - 554.

Schönhar, S. 1975. Untersuchungen über den Befall rückegeschädigter Fichten durch Wundfäulepilze. Allgemeine Forst und Jagdzeitung 150(4):76 - 78.

Sjunnesson, S. 1970. Ett exempel på simulering som analysinstrument för man-maskinsystem vid gallring. Summary: An example of simulation as a tool for analysis of man-machine systems for thinning. Skogshögskolan, Institutionen för skogsteknik. Rapporter och uppsatser 42. 33 s.

Seixas, F., Mcdonald, T.P., Stokes, B.J. & Raper, R.L. 1995. Effect of slash on forwarder soil compaction. In: Sustainability, forest health & meeting the nation´s needs for wood products. Proceedings of the 18th annual meeting of the council on forest engineering. June 5 - 8, 1995. Cashiers, North Carolina: 77 - 86.

Seppälä, R. 1971. Simulation of timber harvesting systems. Seloste: Puun korjuuketjujen simulointi. Folia Forestalia 125. 36 s.

Sirén, M. 1981. Puuston vaurioituminen harvennuspuun korjuussa. Summary: Stand damage in thinning operations. Folia Forestalia 474. 23 s.

— 1982. Puuston vaurioituminen harvennuspuun korjuussa kuormainprosessorilla. Summary: Stand damage in thinning operations with a grapple loader processor. Folia Forestalia 528. 16 s.

— 1986a. Puuston vaurioituminen karsimattomien puiden ja puunosien korjuussa. Summary: Stand damage in logging of undelimbed trees and tree parts. Folia Forestalia 645. 17 s.

— 1986b. Resultater om skadeinventering med två olika metoder. Esitelmämoniste. 2 s.

— 1990. Pienet hakkuukoneet varhaisissa harvennushakkuissa. NSR-tutkimus. Summary: Small multi-function machines in early thinning operations. A joint Nordic NSR-study. Folia Forestalia 743. 29 s.

— , Ala-Ilomäki, J. & Högnäs, T. 1987. Harvennuksiin soveltuvan metsäkuljetus-kaluston maastokelpoisuus. Summary: Mobility of forwarding vehicles used in thinnings. Folia Forestalia 692. 60 s.

Solheim, H. 1987. Misfarging og råte etter såring av gran. Norsk Skogbruk 1: 44 - 45.

— 1990. Misfarging og råte etter såring av gran i tynningsbestånd. Norsk Skogbruk 1: 32 - 33.

— & Selås, P. 1986. Misfarging og microflora i ved etter såring av gran. 1. Utbredelser etter 2 år. Summary: Discoloration and microflora in wood of Picea Abies (L) Karst. after wounding. 1. Spread after 2 years. Norsk institutt for skogforskning. Rapport 7. 16 s.

— & Holen, C. O. 1990. Rotråte - et sunnhetsproblem i norsk granskog. Norsk Skogbruk 36(5):26 - 27.

Sondell, J. 1974. Mätning av stickvägsareal. Skogsarbeten. Stencil, 1974 - 12 - 23.

— 1986. Spårdjupsprov med medelstora skotare. Skogsarbeten. Resultat 11. 4 s.

Spinelli, R. 1995. Ongoing research on the environmental cosenquences of forest harvesting in 14 European countries: how it matches the needs of the forester. In: Kellogg, L. & Milota, G. (eds.). The way ahead with harvesting and transportation technology. Proceedings of IUFRO P3.07 meeting in Tampere, August 6 - 12, 1995. s. 163 - 170.

— 1996. The environmental consequences of harvesting operations: A bibliography. A report from Concerted Action "Cost-Effective Early Thinnings" (AIR2-CT93-1538). Publisher: Ministry of Environment and Energy. Danish Forest and Landscape Research Institute. 193 s.

Steel, R.G.D. & Torrie, J.H. 1981. Principles and procedures of statistics. A biometrical approach. Second edition. McGraw-Hill international book company. 633 s.

Stuart, W.B. 1980. A simulation approach to the analysis of harvesting machines and systems. Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia. 201 s.

— 1981. Harvesting analysis technique: a computer simulation system for timber harvesting. Forest Products Journal 31(11):45 - 53.

Suwala, M. 1997. Off-road transportation means impact on tree damages in late thinnings of pine stands. In: Stokes, B., Lauhanen, R. & Klepac, J. Forest operation and environmental protection. Proceedings of a symposium organized by IUFRO P3.11.00. XX IUFRO World Congress, 6 - 12. August 1995. Tampere, Finland. s. 217 - 226.

Thor, M. & Frohm, S. 1997. Tvingande och selektivt uttag i gallring: Vad betyder maskinstorlek och stickvägsavstånd. SkogForsk, Resultat 5. 4 s.

Tufts, R.A. 1997. Productivity and cost of the Ponsse 15-series, cut-to-length harvesting system in southern pine plantations. Forest Products Journal 47 (10):39 - 46.

Tufts, R. A. & Brinker, R. W. 1993. Productivity of a Scandinavian cut-to-length system while second thinning pine plantations. Forest Products Journal 43(11/12): 24 - 32.

Uusitalo, J. 1994. Sahatavaran laadun ennustaminen mäntytukkirungoista. Summary: Predicting lumber quality of pine stems. Helsingin yliopiston metsävarojen käytön laitoksen julkaisuja 3. 53 s.

Wang, J. & Greene, W.D. 1996. An interactive simulation of partial cutting operations of feller-bunchers. In: Blinn, C.H. & Thompson, M.A. (eds.). Planning and implementing forest operations to achieve sustainable forest. Proceedings of papers presented at the Joint meeting of the Council of Forest Engineering and International Union of Forest Research Organisations. Marguette, Michigan, USA. July 29 - August 1, 1996:227 - 231.

Wronski, E.B. 1990. Logging trials near Tumut: Logger, April/May:10 - 14.

Winsauer, S.A. 1980. A program and documentation for simulation of tracked feller/buncher. U.S. Department of Agriculture Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Research paper NC-192. 25 s.

— , 1982. Simulation of grapple skidders and a whole tree chipper. U.S Department of Agriculture Forest Service, North Central Forest Experiment Station, Research paper NC-221. 42 s.

Wästerlund, I. 1983. Kantträdens tillväxtförluster vid gallring p.g.a. jordpackning och rotskador i stickväg. - En sammanställning och bearbetning av litteraturuppgifter. Summary: Growth reduction of trees near strip roads resulting from soil compaction and damaged roots. Sveriges Skogsvårdförbunds Tidskrift. 2:97 - 109.

— 1985. Compaction of till soils and growth tests with Norway spruce and Scots pine. For. Ecol. Manage. 11:171 - 189.

— 1986a. Skador på mark och rötter. Tänk till i gallringsfrågan! Nya tankar kring stickvägar, skador och teknik i gallring. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat 52: 56 - 63.

— 1986b. The strength of bark on Scots pine and Norway spruce trees. Sveriges lantbruksuniversitet, Institutionen för skogsteknik. Rapport 167. 100 s.

— 1988. Damages and growth effects after selective mechanical cleaning. Scandinavian Journal of Forest Research 3: 259 - 272.

— 1989. Are present forestry machines smooth terrain-machines? SFM meddelande 38:21 - 34.
— 1990. Mark- och beståndsskador efter mekaniserad röjning. Sveriges lantbruks-universitet, Institutionen för skogsteknik. Uppsatser och Resultat 193. 46 s.
— 1992. Extend and causes of site damage due to forestry traffic. Scandinavian Journal of Forest Research 7: 135 - 142.
Yamada, Y. 1995. Maneuverabilities of harvesters in Japanese thinning operations. In: Kellogg, L. & Milota, G. (eds.). The way ahead with harvesting and transportation technology. Proceedings of IUFRO P3.07 meeting. IUFRO XX world congresss. Tampere, Finland. s. 77 - 86.

Yhteensä 196 viitettä

Liite 1. Työntutkimuksessa rekisteröidyt tiedot ja niiden luokitukset.

Tuottavuutta ja siihen vaikuttavia tekijöitä kuvaavat tiedot:

Työpiste juoksevasti numeroiden. Kun kirjattiin siirtyminen, työpiste muuttui.

Siirtymisaika, cmin. Yli 2 m:n siirtymisten ajanmenekki kirjattiin.

Siirtymismatka, m. Yli 2 m:n siirtymiset kirjattiin.

Hakkuulaitteen vienti puulle, asettelu ja katkaisu, cmin.

Ottoetäisyys. Puun kohtisuora etäisyys uran keskeltä, m.

Puulaji: mänty, kuusi, koivu, muu lehtipuu.

Puun arvioitu läpimitta rinnankorkeudella, cm.

Puun käsittelypaikka uran suhteen: käsittely ottopuolella uraa, käsittely vastapuolella uraa ja urapuut (käsittely uralla).

Käsittelypaikan kohtisuora etäisyys uran keskeltä, m.

Karsinnan ja katkonnan ajanmenekki, cmin.

Raivauksen ajanmenekki, cmin.

Hakkuutähteiden tai pölkkyjen järjestelyn ajanmenekki, cmin.

Keskeytysten ajanmenekki, cmin.

Keskeytyksen syy: peruskone, nosturi, hakkuulaite, hydrauliikka, työn suunnittelu, tutkimussyy, muu syy

Työoloja ja liikemääriä kuvaavat tiedot:

Työpiste juoksevasti numeroiden. Kun kirjattiin siirtyminen, työpiste muuttui.

Siirtymismatka, m. Yli 2 m siirtymiset kirjattiin.

Hakkuulaitteen vienti puulle, m.

Ottokulma. Puun ottokulma uran suhteen: otto uralta,

otto viistosti sivulta, otto kohtisuoraan sivulta.

Työtila. Arvioitiin sen vyöhykkeen kapeimman kohdan leveytenä, jossa hakkuulaite vietiin kaadettavalle puulle seuraavin luokin: alle 2 m, 2 - 3 m, 3 - 4 m, yli 4 m. Arviointimenetelmä on esitetty kuvassa 8 sivulla 52.

Puiden lukumäärä työalueella. Laskettiin puiden lukumäärä alueella, mikä saatiin, kun työtilan leveyden määräävien puiden etäisyyteen lisättiin 1 m molemmille puolille ja vyöhykettä jatkettiin 5 m kaadettavan puun taakse (kuva 8 s. 52). Työtilan ja puiden lukumäärän perusteella laskettiin jokaiselle käsiteltävälle rungolle puuston tiheys työalueella, puita/ha.

Siirto puun kanssa, m. Arvioitiin matka, jonka hakkuulaite liikkui, kunnes puu oli kokonaan käsitelty.

Pölkkyjen järjestely, m. Hakkuulaitteen liike pölkkyjä järjesteltäessä.

Hakkuutähteiden järjestely, m. Hakkuulaitteen liike hakkuutähteitä järjesteltäessä.

Raivaus, m. Hakkuulaitteen liike raivattaessa. Raivaus saattoi olla joko yksittäisenä havaintona tai samassa havainnossa puun käsittelyn kanssa.

Kosketuksista rekisteröidyt tiedot ja niiden luokitukset:

Kosketuksen juokseva numero, työpisteen numero ja havainnon numero.

Kosketuspuun puulaji: mänty, kuusi, koivu, muu lehtipuu.

Kosketuskohta etäisyytenä juurenniskasta, dm. Jos esimerkiksi kaadettava puu valui alas toisen puun runkoa pitkin, merkittiin kosketuksen alkamiskorkeus.

Kosketuspuun etäisyys hakkuukoneen nosturin tyvestä kosketushetkellä, m.

Työvaihe kosketuksen syntyessä: siirtyminen, hakkuulaitteen vienti puulle, asettelu ja katkaisu, kaato, siirto puun kanssa, karsinta ja katkonta, järjestely, raivaus.

Kosketuksen aiheuttanut kone-elin tai esine: pyörä, koneen runko, nosturi, hakkuulaite, puu kaadettaessa, puu käsiteltäessä, puu raivattaessa, hakkuutähteet.

Kosketuksen syy: kivi tai kanto, kaltevuus, huono kantavuus, uran kapeus, mutka, poikkeaminen uralta, puun vaikea sijainti, huolimattomuus, muu syy (muu syy oli useimmiten se, että suuria puita kaadettaessa oli usein mahdotonta välttyä kosketuksilta).

Kosketuksen voimakkuus: lievä, voimakas.

Jos kosketuksen saanut puu myöhemmin poistettiin, arvioitiin poistetun puun luokka seuraavasti: metsänhoidollisesti poistettava puu, metsänhoidollisesti kasvatettava puu.

Samaa puuta käsiteltäessä saattoi syntyä kosketus yhtä useampaan puuhun, tai samaan puuhun saattoi syntyä kaksi kosketusta, joilla oli eri aiheuttaja. Samalle havainnolle kirjattiin korkeintaan kahdelle puulle aiheutettu kosketus, ja korkeintaan kaksi eri aiheuttajan kosketusta kirjattiin samalle rungolle. Tätä enempää ei työn luonteen vuoksi ollut mahdollista kirjata samalle havainnolle. Tapaukset, joissa puuta käsiteltäessä syntyi enemmän kuin kaksi kosketusta kahteen eri puuhun, olivat hyvin harvinaisia.

Kosketuspuiden jälkimittauksessa kirjatut tiedot:

Puun läpimitta rinnankorkeudelta, cm.

Mahdollisesti syntyneen vaurion laatu seuraavasti: ei vauriota, pintavaurio (kuori irronnut, puuaines ei vaurioitunut), syvävaurio (puuaines vaurioitunut), katkovaurio (puu poikki).

Mahdollinen aiempi kosketus seuraavasti: ei aiempaa kosketusta, aiempi kosketus vauriotta, aiempi kosketus, josta vaurio. Samaan puuhun saattoi kohdistua kaksi kosketusta eri työsykleillä. Vaurioprosenttia laskettaessa kahden vaurion puita ei näin luettu kahteen kertaan vauriopuuksi.

Mahdollisesti syntyneen vaurion sijainti etäisyytenä juurenniskasta, cm. Sijainti juurenniskassa = 0.

Vaurion pituus cm, leveys cm, pinta-ala cm^2.

Puun etäisyys uran keskeltä, m.

Liite 2. Jälki-inventoinnissa mitatut tiedot ja niiden luokitukset.

Ajourilta mitattiin seuraavat tiedot:

Koealan juokseva numero.

Uraleveys (dm) SLU-menetelmän (Björheden & Fröding 1986) sovellutuksella. Rajatulta kymmenen metrin matkalta mitattiin kohtisuora etäisyys uran keskeltä lähimpään puuhun sekä oikealla että vasemmalla.

Raiteiden syvyys 2 m:n etäisyydellä jakson alusta ja lopusta. Kummastakin mittauspisteestä kirjattiin molempien raiteiden syvyys, cm.

Maalaji: kivennäismaa, turve.

Kantavuus korjuuhetkellä: hyvä, huono.

Kaltevuus: ei kaltevuutta, lievä kaltevuus, runsas kaltevuus.

Kivisyys: ei kivinen, kivinen.

Havutuksen määrä: ei havutusta tai vähäinen havutus, runsas havutus.

Uraväli koealan keskeltä kohtisuorana etäisyytenä oikealla puolella olevalle ja vasemmalla puolelle olevalle uralle. Lisäksi merkittiin, oliko viereinen ura oikealla tai vasemmalla puolella hakattu.

Koealavyöhykkeiltä mitattiin seuraavat ***puustotiedot***:

Koealan juokseva numero.

Vyöhykkeen numero. Koealalle mitattiin 8 vyöhykettä, vyöhykkeet 1 - 4 vasemmalle puolelle uraa ja 5 - 8 oikealle puolelle uraa. Kultakin vyöhykkeeltä mitattiin seuraavat tiedot:

Ainespuumitan täyttävien puiden kantojen lukumäärä, kpl.

Raivattujen puiden lukumäärä (ainespuumittaa täyttämättömien, raivattujen puiden kantojen lukumäärä), kpl.

Jääneiden puiden keskimääräinen läpimitta, cm ja kantojen keskiläpimitta, cm, arvioidulla runkotilavuudella painottaen.

Jääneiden puiden lukumäärä (ainespuukoon täyttävät puut), kpl.

Mäntyjen, kuusien, koivujen ja muiden lehtipuiden lukumäärä, kpl.

Jääneiden, mutta metsänhoidollisesti poistettaviksi arvioitujen puiden lukumäärä, kpl.

Pohjapinta-ala mitattuna kunkin vyöhykkeen keskeltä jakson keskikohdalta, m^2.

Tämän lisäksi mitattiin jokaiselta koealalta puulajeittain puiden pituuksia ja läpimittoja puiden kuutiointia varten.

Puustovauriotiedot mitattiin seuraavasti:

Koealan juokseva numero.

Vyöhykkeen numero kuten puustotiedoissa. Kultakin vyöhykkeeltä mitattiin seuraavat tiedot:

Vaurioituneiden (ainespuumitan täyttävien) puiden lukumäärä, kpl.

Vauriopuiden puulaji, läpimitta $d_{1.3}$, cm, puun kohtisuora etäisyys uran keskeltä, cm, vaurion sijainti puussa etäisyytenä juurenniskasta, cm, vaurion laatu (pintavaurio, syvävaurio, puu poikki), vaurion pituus cm, leveys cm, pinta-ala cm^2, sekä arvio vaurion aiheuttaneesta kone-elimestä ja syystä. Luokitukset olivat samat kuin työntutkimuksessa. Vauriopuusta kirjattiin korkeintaan kaksi vaurioita, jos ne olivat selvästi erillään toisistaan.

Leimikoilta mitattiin lankamittalaitteella ***uraston kokonaispituus*** todellisen uramäärän selvittämiseksi. Hehtaarikohtaisen uramäärän laskemiseksi mitattiin inventoidun alueen pinta-ala murtoviivamonikulmio-mittauksena. Pinta-alaa mitattaessa luettiin mukaan hakkuukoneen työskentelyalue laitimmaisilta urilta.

Ennen työntutkimusta leimikolta mitattiin puulajeittain puiden pituus-läpimittasuhteita sekä kantoläpimitan-rinnankorkeusläpimitan suhteita. Näitä käytettiin puiden kuutioinnissa ja jälkimittauksen tulosten laskennassa. Työntutkija arvioi seurannassa käsiteltyjen puiden rinnankorkeusläpimitat, joiden perusteella puut kuutioitiin. Näin lasketut kuutiomäärät korjattiin vastaamaan hakkuukoneen mittalaitteen antamia tuloksia.

Liite 3. Tutkimusleimikoiden rakenne.

Kuljettaja A.

	Leimikko		
	1	2	3
Harvennuskerta (1 = ensih. 2 = muu harv.)	2	2	2
Pinta-ala, ha	0,60	0,93	2,15
Lähtöpuusto, runkoa/ha	787	1110	1135
Hakattu, runkoa/ha	347	580	463
Jäävä puusto, runkoa/ha	440	530	672
Raivattu, runkoa/ha	7	68	130
Jäävän puuston puulajisuhteet,			
% runkoluvusta (mänty, kuusi, lehtipuu)	0, 98, 2	3,96,1	3,74,23
Poistuman rakenne:			
Mäntyä, kpl (dm^3/runko)	10 (258)	1 (181)	35 (185)
Kuusta, kpl (dm^3/runko)	283 (187)	482 (171)	708 (130)
Lehtipuuta, kpl (dm^3/runko)	3 (161)	4 (297)	115 (191)
Valmistettu puumäärä:			
kpl	296	488	859
dm^3/runko	189	173	143
Korjuukuukausi	3	2	3
Lumi, cm	10	0	10
Routa (0 = ei routaa, 1 = routa maassa)	1	1	1
Maastoluokka	1	1	1
Oksaisuusluokka	1	1	1

Kuljettaja B.

	Leimikko				
	1	2	3	4	5
Harvennuskerta (1=ensih.					
2=muu harv.)	2	1	2	2	2
Pinta-ala, ha	0,65	0,76	0,73	1,15	1,62
Lähtöpuusto, runkoa/ha	844	1708	1185	1414	983
Hakattu, runkoa/ha	229	655	548	677	439
Jäävä puusto, runkoa/ha	615	1053	637	737	544
Raivattu, runkoa/ha	21	447	190	245	79
Jäävän puuston puulajisuhteet,					
% runkoluvusta (mänty, kuusi, lehtipuu)	12, 84, 4	1, 68, 31	0, 90,10	48, 47, 5	7, 91, 2
Poistuman rakenne:					
Mäntyä, kpl (dm^3/runko)	29 (238)	6 (80)	7 (371)	257 167)	93 (412)
Kuusta, kpl (dm^3/runko)	287 (139)	303 (102)	434 (153)	432 140)	509 (165)
Lehtipuuta, kpl (dm^3/runko)	6 (191)	325 (110)	13 (215)	45 (84)	71 (264)
Valmistettu puumäärä:					
kpl	322	634	454	734	673
dm^3/runko	148	105	158	146	210
Korjuukuukausi	1	1	1	6	8
Lumi, cm	20	5	10	0	0
Routa (0 = ei routaa,	1	1	1	0	0
1 = routa maassa)					
Maastoluokka	1	1	1	1	1
Oksaisuusluokka	1	1	1	1	1

Kuljettaja C.

	Leimikko	
	1	2
Harvennuskerta (1 = ensih. 2 = muu harv.)	2	2
Pinta-ala, ha	0,53	0,32
Lähtöpuusto, runkoa/ha	1238	1383
Hakattu, runkoa/ha	649	616
Jäävä puusto, runkoa/ha	589	767
Raivattu, runkoa/ha	393	192
Jäävän puuston puulajisuhteet,		
% runkoluvusta (mänty, kuusi, lehtipuu)	51, 40, 9	5, 92, 3
Poistuman rakenne:		
Mäntyä, kpl (dm^3/runko)	149 (152)	2 (192)
Kuusta, kpl (dm^3/runko)	113 (129)	160 (206)
Lehtipuuta, kpl (dm^3/runko)	1 (53)	9 (67)
Valmistettu puumäärä:		
kpl	263	171
dm^3/runko	142	199
Korjuukuukausi	12	1
Lumi, cm	20	15
Routa (0 = ei routaa, 1 = routa maassa)	1	1
Maastoluokka	1	1
Oksaisuusluokka	2	1

Kuljettaja D.

	Leimikko				
	1	2	3	4	5
Harvennuskerta (1 = ensih.					
2 = muu harv.)	2	2	2	2	2
Pinta-ala, ha	0,73	0,72	1,55	1,85	0,41
Lähtöpuusto, runkoa/ha	1046	1097	1329	945	1315
Hakattu, runkoa/ha	458	477	667	479	738
Jäävä puusto, runkoa/ha	588	620	662	466	577
Raivattu, runkoa/ha	108	171	11	302	280
Jäävän puuston puulajisuhteet,					
% runkoluvusta (mänty,					
kuusi, lehtipuu)	5, 79, 16	2, 90, 8	98, 2, 0	5, 93, 2	17, 83, 0
Poistuman rakenne:					
Mäntyä, kpl (dm^3/runko)	10 (257)	8 (108)	1155 (85)	17 (264)	14 (99)
Kuusta, kpl (dm^3/runko)	329 (84)	263 (108)	37 (132)	884 (129)	301 (84)
Lehtipuuta, kpl (dm^3/runko)	41 (93)	31 (52)	0	30 (71)	3 (39)
Valmistettu puumäärä:					
kpl	380	302	1192	931	318
dm^3/runko	90	102	87	129	84
Korjuukuukausi	12	12	5	11	11
Lumi, cm	10	5	0	0	0
Routa (0 = ei routaa,	1	1	0	0	0
1 = routa maassa)					
Maastoluokka	1	1	1	1	1
Oksaisuusluokka	1	1	1	1	1

Työntutkimuskuljettajien vertailuaineisto

	A 1	A2	B1	C1	D1
Harvennuskerta (1 = ensih. 2 = muu harv.)	2	2	2	2	2
Pinta-ala, ha	0,43	0,76	0,95	0,76	0,75
Lähtöpuusto, runkoa/ha	1367	1241	1212	1014	1206
Hakattu, runkoa/ha	742	602	458	407	526
Jäävä puusto, runkoa/ha	625	639	754	607	680
Raivattu, runkoa/ha	67	676	330	407	118
Jäävän puuston puulajisuhteet, % runkoluvusta (mänty, kuusi, lehtipuu)	8, 88, 4	0, 70,30	2, 87, 11	7, 86, 7	0, 91, 9
Valmistettu puumäärä:					
kpl	319	458	435	309	395
dm^3/runko	128	88	85	138	95
Korjuukuukausi	2	2	1	2	12
Lumi, cm	10	10	15	10	5
Routa (0 = ei routaa, 1 = routa maassa)	1	1	1	1	1
Maastoluokka	1	1	1	1	1
Oksaisuusluokka	1	1	1	1	1

Muiden kuljettajien aineisto

	Leimikko			
	E1	E2	E3	F1
Harvennuskerta (1 = ensih. 2 = muu harv.)	2	2	2	2
Pinta-ala, ha	0,34	0,67	0,55	0,65
Lähtöpuusto, runkoa/ha	951	1079	997	1193
Hakattu, runkoa/ha	420	508	472	646
Jäävä puusto, runkoa/ha	531	571	525	547
Raivattu, runkoa/ha	12	132	59	68
Jäävän puuston puulajisuhteet, % runkoluvusta (mänty, kuusi, lehtipuu)	8, 67, 25	12, 79, 9	5, 90, 5	0, 96, 4
Valmistettu puumäärä:				
kpl	143	340	260	420
dm^3/runko	185	77	87	150
Korjuukuukausi	1	2	3	12
Lumi, cm	10	0	15	15
Routa (0 = ei routaa, 1 = routa maassa)	1	1	1	1
Maastoluokka	1	1	1	2
Oksaisuusluokka	1	1	1	1

Liite 4. Kovarianssitaulut ja parittaiset vertailut.

4.1 Kovarianssianalyysi puulajin, kuljettajan, käsittelypuolen ja rungon koon vaikutuksesta karsinnan ja katkonnan ajanmenekkiin sekä ajanmenekin korjattujen keskiarvojen parittaiset vertailut. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

Vaihtelun lähde	Kovarianssianalyysin tunnusluvut (tyyppi III)			
	df	MS	F	p
Rungon koko	1	1185997,8	4076,25	0,0001
Puulaji	2	13401,4	46,06	0,0001
Kuljettaja	3	23608,8	81,14	0,0001
Käsittelypuoli	2	5412,8	18,60	0,0001
Rungon koko*puulaji	2	86251,5	296,44	0,0001
Rungon koko*kuljettaja	3	54244,6	186,44	0,0001
Jäännös	7692	291,0		

Puulaji	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
			p	i/j	1	2	3
Mänty	34,75	0,47	0,0001	1	.	0,0001	0,0001
Kuusi	32,85	0,29	0,0001	2	0,0001	.	0,0001
Koivu	42,90	0,84	0,0001	3	0,0001	0,0001	.

Kuljet- taja	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)					
			p	i/j	1	2	3	4
A	29,87	0,51	0,0001	1	.	0,0001	0,0001	0,0001
B	46,02	0,42	0,0001	2	0,0001	.	0,9554	0,0001
C	45,97	0,88	0,0001	3	0,0001	0,9554	.	0,0001
D	25,46	0,43	0,0001	4	0,0001	0,0001	0,0001	.

Käsittely- puoli	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
			p	i/j	1	2	3
0	35,34	0,48	0,0001	1	.	0,0093	0,0001
1	36,60	0,44	0,0001	2	0,0093	.	0,0001
2	38,57	0,48	0,0001	3	0,0001	0,0001	.

4.2 Kovarianssianalyysi puulajin, kuljettajan, käsittelypuolen, ottoetäisyyden, puiden lukumäärän työalueella ja rungon koon vaikutuksesta runkokohtaiseen tehoajanmenekkiin sekä ajanmenekin korjattujen keskiarvojen parittaiset vertailut. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

Vaihtelun lähde	Kovarianssianalyysin tunnusluvut (tyyppi III)			
	df	MS	F	p
Rungon koko	1	2079649,9	3586,93	0,0001
Puulaji	2	28926,6	49,89	0,0001
Kuljettaja	3	118402,3	204,22	0,0001
Käsittelypuoli	2	15130,5	26,10	0,0001
Ottoetäisyys	1	18056,7	31,14	0,0001
Puiden lukumäärä työalueella, runkoa/ha	1	7597,7	13,10	0,0003
Rungon koko*kuljettaja	3	83010,4	143,17	0,0001
Jäännös	7682	579,8		

Puulaji	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
			p	i/j	1	2	3
Mänty	59,87	0,67	0,0001	1	.	0,0001	0,0001
Kuusi	55,61	0,42	0,0001	2	0,0001	.	0,0001
Koivu	65,91	1,19	0,0001	3	0,0001	0,0001	.

Kuljet-	Sovitettu	Keskiarvon	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)					
taja	keskiarvo	keskivirhe	p	i/j	1	2	3	4
A	46,21	0,73	0,0001	1	.	0,0001	0,0001	0,0376
B	78,06	0,58	0,0001	2	0,0001	.	0,0001	0,0001
C	73,07	1,25	0,0001	3	0,0001	0,0001	.	0,0001
D	44,52	0,61	0,0001	4	0,0376	0,0001	0,0001	.

Käsittely-	Sovitettu	Keskiarvon	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
puoli	keskiarvo	keskivirhe	p	i/j	1	2	3
0	57,45	0,69	0,0001	1	.	0,0001	0,0001
1	61,01	0,63	0,0001	2	0,0001	.	0,0070
2	62,94	0,69	0,0001	3	0,0001	0,0070	.

4.3 Kovarianssianalyysi puulajin, kuljettajan, käsittelypuolen, ottoetäisyyden, puiden lukumäärän työalueella ja rungon koon vaikutuksesta runkokohtaiseen kokonaisajanmenekkiin sekä ajanmenekin korjattujen keskiarvojen parittaiset vertailut. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

Vaihtelun lähde	Kovarianssianalyysin tunnusluvut (tyyppi III)			
	df	MS	F	p
Rungon koko	1	2100269,6	2209,35	0,0001
Puulaji	2	35905,5	37,77	0,0001
Kuljettaja	3	332607,1	349,88	0,0001
Käsittelypuoli	2	10165,3	10,69	0,0001
Ottoetäisyys	1	21425,1	22,54	0,0001
Puiden lukumäärä työalueella, runkoa/ha	1	14293,7	15,04	0,0001
Rungon koko*kuljettaja	3	78387,0	82,46	0,0001
Jäännös	7682	950,6		

Puulaji	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
			p	i/j	1	2	3
Mänty	74,11	0,85	0,0001	1	.	0,6479	0,0001
Kuusi	73,70	0,53	0,0001	2	0,6479	.	0,0001
Koivu	86,99	1,51	0,0001	3	0,0001	0,0001	.

Kuljet-taja	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)					
			p	i/j	1	2	3	4
A	57,96	0,93	0,0001	1	.	0,0001	0,0001	0,0683
B	103,49	0,75	0,0001	2	0,0001	.	0,0001	0,0001
C	95,57	1,60	0,0001	3	0,0001	0,0001	.	0,0001
D	56,05	0,78	0,0001	4	0,0683	0,0001	0,0001	.

Käsittely-puoli	Sovitettu keskiarvo	Keskiarvon keskivirhe	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
			p	i/j	1	2	3
0	75,74	0,88	0,0001	1	.	0,0008	0,0001
1	78,87	0,80	0,0001	2	0,0008	.	0,1547
2	80,18	0,88	0,0001	3	0,0001	0,1547	.

4.4 Kovarianssianalyysi kuljettajan, käsittelypuolen, ottoetäisyyden ja rungon koon vaikutuksesta runkokohtaiseen tehollisen liiketyön määrään m/valmistettu runko sekä liiketyön määrien korjattujen keskiarvojen parittaiset vertailut. Käsittelypuolet: 0 = otto uralta, 1 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, käsittely ottopuolella uraa, 2 = otto viistosti tai kohtisuoraan sivulta, vienti uran yli.

Vaihtelun lähde	Kovarianssianalyysin tunnusluvut (tyyppi III)			
	df	MS	F	p
Rungon koko	1	13446,9	931,92	0,0001
Kuljettaja	3	1603,4	111,12	0,0001
Käsittelypuoli	2	14416,1	999,09	0,0001
Ottoetäisyys	1	9110,2	631,37	0,0001
Jäännös	7698	14,4		

Kuljet-	Sovitettu	Keskiarvon	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)					
taja	keskiarvo	keskivirhe	p	i/j	1	2	3	4
A	12,40	0,09	0,0001	1	.	0,0013	0,0001	0,0001
B	12,02	0,08	0,0001	2	0,0013	.	0,0001	0,0001
C	11,16	0,18	0,0001	3	0,0001	0,0001	.	0,0003
D	10,45	0,07	0,0001	4	0,0001	0,0001	0,0003	.

Käsittely-	Sovitettu	Keskiarvon	Pr > I T I H_0: keskiarvo(i) = keskiarvo(j)				
puoli	keskiarvo	keskivirhe	p	i/j	1	2	3
0	10,26	0,09	0,0001	1	.	0,0001	0,0001
1	9,78	0,08	0,0001	2	0,0001	.	0,0001
2	14,48	0,09	0,0001	3	0,0001	0,0001	.

ISBN 951-40-1635-1
ISSN 0358-4283
Hakapaino Oy 1998